



## **TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

# **ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA ATENDER PARCIALMENTE O INSTITUTO CENTRAL DE CIÊNCIAS DA UNB – OBTENÇÃO DA ENERGIA NECESSÁRIA ATRAVÉS DE UMA SIMULAÇÃO TERMOENERGÉTICA**

**Autor: Henrique Lucas Oliveira Evangelista**

**Orientador: Prof. Dr. Rafael Amaral Shayani**

**Brasília, novembro de 2018**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DE UM SISTEMA  
FOTOVOLTAICO PARA ATENDER PARCIALMENTE O  
INSTITUTO CENTRAL DE CIÊNCIAS DA UNB – OBTENÇÃO  
DA ENERGIA NECESSÁRIA ATRAVÉS DE UMA  
SIMULAÇÃO TERMOENERGÉTICA**

**Henrique Lucas Oliveira Evangelista**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

APROVADA POR:

---

**Prof. Dr. Rafael Amaral Shayani, UnB/ ENE**  
(Orientador)

---

**Prof. Dr. João Manoel Dias Pimenta, UnB/ ENM**  
(Professor convidado)

---

**Prof. Me. Ronaldo Sérgio Chacon Camargos, IFB**  
(Professor convidado)

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

LUCAS OLIVEIRA EVANGELISTA, HENRIQUE

Análise técnico-econômica de um sistema fotovoltaico para atender parcialmente o Instituto Central de Ciências da UnB – Obtenção da energia necessária através de uma simulação termoenergética 2018.

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia

Departamento de Engenharia Elétrica. Orientação: Prof. Dr. Rafael Amaral Shayani.

- |                                  |                              |
|----------------------------------|------------------------------|
| 1. Energia Solar Fotovoltaica    | 2. Simulação Termoenergética |
| 3. Instituto Central de Ciências | 4. Análise técnico-econômica |

I. ENE/FT/UnB

## **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

EVANGELISTA, H. L. O. (2018). Análise técnico-econômica de um sistema fotovoltaico para atender parcialmente o Instituto Central de Ciências da UnB – Obtenção da energia necessária através de uma simulação termoenergética. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica, 2018, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, DF, 163p.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente aos meus pais que sempre colocaram a minha educação acima de tudo. Não conseguiria chegar até aqui se não fosse o esforço e a dedicação de ambos.

A toda a minha família, agradeço por todo o apoio e compreensão nos momentos mais difíceis. Aos meus irmãos, obrigado pelos momentos de risadas e brincadeiras diárias que é rotina em nossas vidas. A minha namorada, Helena, agradeço imensamente pelo apoio e motivação diária que facilitaram muito a realização deste trabalho.

Aos meus amigos de curso e de Centro Acadêmico, obrigado por tornarem a universidade um lugar melhor e os semestres menos estressantes.

Ao professor Rafael Shayani, obrigado pelo apoio e excelente orientação dada ao longo dos últimos 3 semestres. Agradeço imensamente pelo profissionalismo, paciência e comentários relevantes feitos acerca do trabalho.

A prefeitura da Universidade de Brasília, agradeço pelas informações fornecidas, sempre de bom grado e sem dificuldades.

Agradeço ao Julio César, diretor do CEPLAN-UnB, por fornecer as informações e plantas baixas do Instituto Central de Ciências. Os dados fornecidos foram vitais para a realização deste trabalho.

## RESUMO

Neste trabalho é realizado um estudo da viabilidade técnica e econômica da instalação de um sistema fotovoltaico no telhado do Instituto Central de Ciências com o objetivo de suprir o consumo de energia dos 18 anfiteatros deste prédio. O valor de consumo foi obtido através da simulação termoenergética destes ambientes, realizando uma série de hipóteses simplificadoras. A modelagem realizada foi validada através da medição do consumo de energia do sistema de ar-condicionado presente no anfiteatro 2 do ICC, sendo em seguida realizada a simulação deste período. Foi obtida uma diferença de 7,45% entre o consumo medido e simulado. Realizando a simulação do consumo de energia anual, considerando a operação regular dos sistemas de ar-condicionado, obteve-se o valor de 639,04 MWh. Com este valor, o sistema fotovoltaico foi projetado de forma a suprir o consumo de energia. Os valores injetados na rede pelo sistema fotovoltaico foram comparados com os valores de consumo simulado dos anfiteatros. O sistema fotovoltaico foi dividido em 18 subsistemas de 22 kW<sub>p</sub>, um para cada anfiteatro, totalizando 496 kW<sub>p</sub> de potência nominal. A disposição dos módulos foi sugerida levando-se em consideração o sombreamento presente no telhado do prédio. Os resultados obtidos do trabalho indicam que o sistema em estudo é tecnicamente viável. Além disso, a análise de viabilidade econômica do sistema em questão indica que o projeto é lucrativo, apresentando um tempo de retorno de investimento de 9,06 anos, uma Taxa Interna de Retorno de 13,3% e um Retorno de Investimento de 56,71%. Por fim, a análise de sensibilidade evidencia a influência do custo inicial do projeto, da taxa mínima de atratividade, da taxa de degradação dos módulos e do reajuste tarifário na viabilidade econômica do projeto.

**PALAVRAS-CHAVE:** Energia Solar Fotovoltaica, Simulação Termoenergética, Instituto Central de Ciências, Análise técnico-econômica, Sistemas de Ar-condicionado.

## ABSTRACT

In this work is carried out a study of the technical and economic viability of the installation of a photovoltaic system on the roof of "*Instituto Central de Ciências*" with the objective of supplying the energy consumption of the 18 amphitheatres of this building. The consumption value was obtained through the energy modeling of these environments, realizing a series of simplifying hypotheses. The modeling was validated by measuring the energy consumption of the air conditioning system present in amphitheater 2 of the "ICC", followed by the simulation of this period. A difference of 7.45% was obtained between measured and simulated consumption. Simulating the annual energy consumption, considering the regular operation of air conditioning systems, the value of 639.04 MWh was obtained. With this value, the photovoltaic system was designed in order to supply the energy consumption, being the impacts on the university's electrical demand also considered. The values injected into the electrical network by the photovoltaic system were compared with the simulated consumption values of the amphitheatres. The photovoltaic system was divided into 18 subsystems of 22 kWp, one for each amphitheater, totaling 496 kWp of nominal power. The arrangement of the modules was suggested considering the shading present on the roof of the building. The results obtained from the study indicate that the project is technically feasible. In addition, the economic viability analysis of the system in question indicates that the project is profitable, with a return on investment of 9,06 years, an Internal Rate of Return of 13,3% and an Investment Return of 56,71%. Finally, the sensitivity analysis shows the influence of the initial cost of the project, the minimum rate of attractiveness, the rate of degradation of the modules and the tariff readjustment in the economic viability of the project.

KEY WORDS: Photovoltaic Solar Energy, Energy Modeling, Instituto Central de Ciências, Technical and economic analysis, Air-conditioning systems.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Previsão de crescimento da capacidade das fontes de energia renovável.....	7
Figura 2 - Aumento da capacidade da energia solar fotovoltaica, usinas fotovoltaicas e geração distribuída. ....	8
Figura 3 - Unidades consumidoras com geração solar fotovoltaica entre 2012 e 2017.....	12
Figura 4 - Configuração típica de um sistema fotovoltaico conectado à rede. ....	14
Figura 5 - Diagrama de um ciclo de refrigeração básico. ....	19
Figura 6 - Sistema tipo "split".....	20
Figura 7 - Vista aérea do Instituto Central de Ciências da Universidade de Brasília. ....	26
Figura 8 - Foto de um dos anfiteatros do ICC. ....	27
Figura 9 - Fluxograma para a Simulação Termoenergética. ....	30
Figura 10 - Exemplo do uso do recurso "Zone Multiplier" no software DesignBuilder. ....	34
Figura 11 - Fluxograma da metodologia adotada para a elaboração do projeto técnico do sistema fotovoltaico. .....	46
Figura 12 - Fluxograma da metodologia utilizada para a análise econômica.....	53
Figura 13 - Custo total da instalação de um sistema fotovoltaico. ....	54
Figura 14 - Preço médio de sistemas fotovoltaicos em 2017 para diferentes .....	55
Figura 15 - Wattímetro medidor de energia Minipa ET-4050. ....	62
Figura 16 - Fluxo de trabalho do software DesignBuilder. ....	64
Figura 17 - Hierarquia de dados no software DesignBuilder. ....	66
Figura 18 - Tela do software DesignBuilder.....	67
Figura 19 - Otimização da inclinação e do azimute dos painéis fotovoltaicos em função da produção anual de energia.....	68
Figura 20 - Etapa de dimensionamento do sistema no software PVsyst.....	68
Figura 21 - Escolha dos módulos e inversor no software PVsyst .....	69
Figura 22 - Modelo tridimensional do ICC elaborado no DesignBuilder. ....	75
Figura 23 - Modelagem do ICC renderizada . ....	75
Figura 24 - Detalhe do ICC Sul no modelo. ....	76
Figura 25 - Entrada do anfiteatro 3 no prédio simulado. ....	76
Figura 26 - Modelagem tridimensional do anfiteatro 4 no software DesignBuilder. ....	78
Figura 27 - Comparação entre a capacidade sugerida e a capacidade instalada nos anfiteatros modelados. ....	80
Figura 28 – Gráfico da potência média calculada a partir das medições realizadas.....	83
Figura 29 - Potência simulada do sistema de ar condicionado do anfiteatro 2 para o período das medições. ....	84
Figura 30 – Relação entre a potência elétrica do aparelho de ar condicionado simulado e a taxa de resfriamento (COP).....	85
Figura 31 – Comparação entre a potência média simulada e a potência média do aparelho real. ....	86
Figura 32 - Consumo de energia do anfiteatro 2.....	87
Figura 33 - Consumo de energia do anfiteatro 3.....	87

<i>Figura 34 - Consumo de energia do anfiteatro 4.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 35 - Consumo de energia do anfiteatro 7.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 36 - Consumo de energia do anfiteatro 11.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 37 - Selo PROCEL de economia de energia para condicionadores de ar Split Cassete. ....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 38 - Consumo de todos os anfiteatros modelados .....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 39 - Consumo de energia elétrica de todos os anfiteatros do Instituto Central de Ciências da Universidade de Brasília. ....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 40 - Potência dos equipamentos do anfiteatro 2 em um dia típico.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 41 - Curva de carga simulada para o anfiteatro 2.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 42 - Simulação das curvas de carga para os anfiteatros modelados. ....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 43 - Simulação da curva de carga para todos os anfiteatros do Instituto Central de Ciências. ....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 44 - Curva de carga do medidor geral da UnB em 2017 em dias úteis.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 45 - Comparação entre a curva de carga do medidor geral e da curva de carga simulada dos anfiteatros do ICC.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 46 - Modelagem tridimensional do Instituto Central de Ciências no software SketchUp .....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 47 - Vista do ICC norte modelado.....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 48 - Direção do prédio em relação ao norte geográfico.....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 49 - Árvore presente no ICC Norte. ....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 50 - Presença de condensadoras de sistemas de ar condicionado no telhado do ICC Norte. ....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 51 - Condensadoras e árvores inseridas na modelagem tridimensional do ICC. ....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 52 - Presença das condensadoras e árvores inseridas no modelo do ICC Sul.....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 53 - Presença das condensadoras e árvores inseridas no modelo do ICC Norte. ....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 54 - Sombreamento no ICC Norte no dia 21 de junho (Solstício de inverno). ....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 55 - Sombreamento no ICC Sul no dia 21 de junho (Solstício de inverno) .....</i>	<i>101</i>
<i>Figura 56 - Áreas desprezadas no bloco B do ICC para a instalação do sistema fotovoltaico.....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 57 - Áreas desprezadas no bloco B do ICC Norte. ....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 58 - Áreas desprezadas no bloco B do ICC Sul. ....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 59 – Energia gerada por um subsistema do projeto .....</i>	<i>107</i>
<i>Figura 60 - Energia gerada pelos 18 subsistemas. ....</i>	<i>108</i>
<i>Figura 61 - Disposição das placas no ICC Norte.....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 62 - Detalhe das placas do ICC Norte, onde foi considerado o sombreamento causado pela árvore. ....</i>	<i>110</i>
<i>Figura 63 - Todos os 9 subsistemas presentes no ICC Norte.....</i>	<i>110</i>
<i>Figura 64 - Disposição das placas fotovoltaicas no telhado do ICC Sul .....</i>	<i>110</i>
<i>Figura 65 - Disposição de todos os 9 subsistemas fotovoltaicos no ICC Sul .....</i>	<i>111</i>
<i>Figura 66 - Disposição do sistema fotovoltaico no telhado do Instituto Central de Ciências. ....</i>	<i>111</i>
<i>Figura 67 - Disposição dos componentes do subsistema fotovoltaico .....</i>	<i>112</i>
<i>Figura 68 - Capacidade de condução de corrente do cabo Prysmian Afumex Solar.....</i>	<i>114</i>
<i>Figura 69 - Diagrama elétrico geral do subsistema fotovoltaico. ....</i>	<i>119</i>



<i>Figura 70 - Detalhamento da String box CC 1 .....</i>	<i>120</i>
<i>Figura 71 - Detalhamento da String box CC 2 e conexão com o inversor. ....</i>	<i>121</i>
<i>Figura 72 - Detalhamento da String box CA e conexão com a rede .....</i>	<i>122</i>
<i>Figura 73 - Energia mensal consumida pelos anfiteatros e produzida pelo sistema fotovoltaico.....</i>	<i>123</i>
<i>Figura 74 - Potência média produzida pelo sistema fotovoltaico .....</i>	<i>124</i>
<i>Figura 75 - Comparação entre a curva de carga dos anfiteatros e a curva de potência gerada pelo sistema fotovoltaico. ....</i>	<i>124</i>
<i>Figura 76 - Valor do dólar comercial em relação ao Real entre outubro de 2017 e outubro de 2018. ....</i>	<i>127</i>
<i>Figura 77 - Sensibilidade da TIR com relação ao investimento inicial. ....</i>	<i>133</i>
<i>Figura 78 - Sensibilidade do Payback com relação ao investimento inicial.....</i>	<i>133</i>
<i>Figura 79 - Sensibilidade do VPL com relação ao investimento inicial .....</i>	<i>134</i>
<i>Figura 80 - Sensibilidade do VPL com relação à TMA.....</i>	<i>135</i>
<i>Figura 81 - Sensibilidade do Payback descontado com relação à TMA.....</i>	<i>135</i>
<i>Figura 82 - Sensibilidade da TIR com relação a taxa de degradação do sistema. ....</i>	<i>136</i>
<i>Figura 83 - Sensibilidade do VPL com relação a taxa de degradação do sistema. ....</i>	<i>137</i>
<i>Figura 84 - Sensibilidade do Payback descontado com relação a taxa de degradação do sistema. ....</i>	<i>137</i>
<i>Figura 85 - Sensibilidade da TIR em relação ao reajuste tarifário.....</i>	<i>138</i>
<i>Figura 86 - Sensibilidade do VPL em relação ao reajuste tarifário .....</i>	<i>139</i>
<i>Figura 87 - Sensibilidade do Payback em relação ao reajuste tarifário.....</i>	<i>139</i>

## LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 - Dados dos anfiteatros considerados no cálculo da carga térmica .....</i>	<i>36</i>
<i>Tabela 2 - Valores utilizados para o cálculo da carga térmica dos anfiteatros.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabela 3 - Especificações técnicas dos sistemas de ar condicionado nos anfiteatros simulados. ....</i>	<i>38</i>
<i>Tabela 4 - Ocupação do anfiteatro 2 no segundo semestre de 2018 .....</i>	<i>44</i>
<i>Tabela 5 - Dados coletados dos anfiteatros .....</i>	<i>74</i>
<i>Tabela 6 - Anfiteatros semelhantes aos anfiteatros que serão modelados .....</i>	<i>77</i>
<i>Tabela 7 - Dados construtivos dos anfiteatros simulados .....</i>	<i>78</i>
<i>Tabela 8 - Resultados obtidos para o cálculo da carga térmica .....</i>	<i>79</i>
<i>Tabela 9 - Comparação entre a potência sugerida pelo software e a potência instalada dos sistemas de ar condicionado dos anfiteatros modelados.....</i>	<i>80</i>
<i>Tabela 10 – Valores das medições realizadas .....</i>	<i>82</i>
<i>Tabela 11 – Valores de energia medida e potência média calculada.....</i>	<i>83</i>
<i>Tabela 12 – Consumo de energia simulada e medida do aparelho de ar condicionado do Anfiteatro 2. ....</i>	<i>86</i>
<i>Tabela 13 - Parâmetros utilizados na simulação para um subsistema de 22 kWp. ....</i>	<i>105</i>
<i>Tabela 14 - Parâmetros elétricos (em STC) do módulo fotovoltaico utilizado.....</i>	<i>106</i>
<i>Tabela 15 - Parâmetros elétricos nominais do inversor utilizado.....</i>	<i>106</i>
<i>Tabela 16 - Perdas inseridas na simulação.....</i>	<i>107</i>
<i>Tabela 17 - Características do sistema fotovoltaico projetado. ....</i>	<i>108</i>
<i>Tabela 18 - Detalhamento das caixas de junção. ....</i>	<i>113</i>
<i>Tabela 19 - Dimensionamento do condutor para o lado de corrente contínua.....</i>	<i>115</i>
<i>Tabela 20 - Dimensionamento do condutor para o lado de corrente contínua.....</i>	<i>115</i>
<i>Tabela 21 - Dimensionamento do condutor para o lado de corrente alternada (após o inversor) .....</i>	<i>115</i>
<i>Tabela 22 - Dimensionamento do condutor para o lado de corrente alternada (após o inversor) .....</i>	<i>116</i>
<i>Tabela 23 - Dimensionamento do disjuntor em corrente contínua .....</i>	<i>117</i>
<i>Tabela 24 - Dimensionamento dos fusíveis para cada string .....</i>	<i>117</i>
<i>Tabela 25 - Dimensionamento do disjuntor após o inversor .....</i>	<i>117</i>
<i>Tabela 26 - Especificações dos Dispositivos de Proteção contra Surtos. ....</i>	<i>118</i>
<i>Tabela 27 - Custos de investimento para o projeto (Capex).....</i>	<i>126</i>
<i>Tabela 28 - Custo de operação e manutenção (Opex).....</i>	<i>127</i>
<i>Tabela 29 - Tarifas THS da CEB para unidades consumidoras do grupo A4 .....</i>	<i>128</i>
<i>Tabela 30 - Dados utilizados para a elaboração do fluxo de caixa do projeto .....</i>	<i>130</i>
<i>Tabela 31 - Fluxo de caixa do projeto.....</i>	<i>131</i>
<i>Tabela 32 - Resultados dos indicadores analisados.....</i>	<i>132</i>
<i>Tabela 33 - Dados climáticos de Brasília no dia 21 de junho de 2018.....</i>	<i>150</i>
<i>Tabela 34 - Cronograma de ocupação para um dia típico do anfiteatro 4 .....</i>	<i>151</i>

<i>Tabela 35 – Cronograma de ocupação para um dia típico do anfiteatro 7.....</i>	<i>152</i>
<i>Tabela 36 - Valores de consumo de energia no anfiteatro 2.....</i>	<i>153</i>
<i>Tabela 37 - Valores de consumo de energia no anfiteatro 3.....</i>	<i>153</i>
<i>Tabela 38 - Valores de consumo de energia no anfiteatro 4.....</i>	<i>154</i>
<i>Tabela 39 - Valores de consumo de energia no anfiteatro 7.....</i>	<i>154</i>
<i>Tabela 40 - Valores de consumo de energia no anfiteatro 11.....</i>	<i>155</i>
<i>Tabela 41 - Valores do consumo de energia de todos os anfiteatros do ICC.....</i>	<i>155</i>

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
ANF	Anfiteatro
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
BT	Baixa Tensão
CA	Corrente Alternada
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CC	Corrente Contínua
CEB	Central Energética de Brasília C
CRESCESB	Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
COP	Coeficiente de Performance
DPS	Dispositivo de proteção contra surtos
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FV	Fotovoltaico
I	Corrente
ICC	Instituto Central de Ciências
IEA	International Energy Agency
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPHAN	Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional
kW	Quilowatt kWh Quilowatt-hora
kWp	Quilowatt-pico
LID	Degradação do Módulo por Luz (Light Induced Degradation)
MME	Ministério de Minas e Energia
MPPT	Maximum Power Point Tracking
MW	Megawatt
MWh	Megawatt-hora
NBR	Norma Brasileira
NR	Norma Regulamentadora
O&M	Operação e Manutenção
ONU	Organização das Nações Unidas
PMOC	Plano de Manutenção, Operação e Controle
Procel	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica da Aneel
SFV	Sistema Fotovoltaico
STC	Standard Test Conditions
TIR	Taxa Interna de Retorno

TJP	Taxa de Longo Prazo
TMA	Taxa mínima de atratividade
UnB	Universidade de Brasília
UV	Ultravioleta
V	Volt
VP	Valor Presente
VPL	Valor Presente Líquido
W	Watt
Wp	Watt-pico

# Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivo do trabalho .....	4
1.1.1 Objetivo geral .....	4
1.1.2 Objetivos específicos.....	4
1.2 Estrutura do trabalho .....	5
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>6</b>
2.1 Sustentabilidade e o cenário energético mundial.....	6
2.2 Sistemas Fotovoltaicos no contexto brasileiro .....	8
2.2.1 Incentivos à utilização de sistemas fotovoltaicos no Brasil.....	9
2.2.2 Resoluções normativas nº 482/2012 e 687/2015 da ANEEL .....	11
2.3 Principais componentes dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede.....	13
2.4 Projeto de sistemas fotovoltaicos.....	15
2.4.1 Legislação e aspectos normativos a serem considerados no projeto fotovoltaico.....	16
2.5 Sistemas de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (AVAC) .....	17
2.5.1 Conceitos relevantes.....	17
2.5.2 Tipos de sistemas de ar-condicionado .....	19
2.5.3 Saúde e bem-estar em ambientes fechados .....	21
2.5.4 Legislação vigente.....	22
2.6 Simulação termoenergética .....	23
2.7 O Instituto Central de Ciências .....	26
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>28</b>
3.1 Metodologia para a simulação termoenergética .....	29
3.1.1 Delimitação do escopo da simulação .....	31
3.1.2 Coleta de dados .....	31
3.1.3 Hipóteses simplificadoras.....	31
3.1.4 Modelagem em 3D do prédio .....	32
3.1.5 Modelagem dos anfiteatros .....	33
3.1.6 Simulação da carga térmica .....	35
3.1.7 Modelagem dos sistemas de ar condicionado.....	38

3.1.8	Validação do consumo de energia .....	40
3.1.9	Simulação do consumo anual de energia dos anfiteatros .....	43
3.2	Metodologia para a análise técnica do sistema fotovoltaico .....	45
3.2.1	Levantamento de dados .....	47
3.2.2	Modelagem em 3D do prédio .....	48
3.2.3	Estudo de sombreamento .....	48
3.2.4	Dimensionamento do sistema .....	48
3.2.5	Escolha dos componentes e simulação da energia gerada .....	49
3.2.6	Disposição das placas fotovoltaicas no telhado .....	50
3.2.7	Projeto elétrico .....	50
3.2.8	Comparação entre a energia gerada pelo sistema fotovoltaico e a consumida pelos anfiteatros.....	52
3.3	Metodologia para a análise econômica.....	52
3.3.1	Orçamento.....	54
3.3.2	Valor anual economizado .....	55
3.3.3	Formação do fluxo de caixa .....	56
3.3.4	Análise do investimento.....	57
3.3.5	Análise de sensibilidade .....	61
3.4	Materiais utilizados .....	61
3.4.1	Medidor de energia .....	61
3.4.2	Ferramentas computacionais .....	62
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>73</b>
4.1	Resultados da modelagem energética.....	73
4.1.1	Coleta de dados .....	73
4.1.2	Modelagem em 3D do edifício.....	74
4.1.3	Modelagem dos anfiteatros .....	77
4.1.4	Simulação da carga térmica .....	79
4.1.5	Validação do consumo de energia .....	81
4.1.6	Simulação do consumo anual de energia dos anfiteatros .....	87
4.2	Resultados da análise técnica do sistema fotovoltaico .....	95
4.2.1	Modelagem tridimensional do prédio.....	95
4.2.2	Estudo de sombreamento .....	97
4.2.3	Dimensionamento do sistema .....	103
4.2.4	Escolha dos componentes e simulação da energia gerada .....	104

4.2.5	Disposição das placas fotovoltaicas no telhado .....	108
4.2.6	Projeto elétrico .....	112
4.2.7	Comparação entre a energia gerada pelo sistema fotovoltaico e a consumida pelos anfiteatros.....	123
4.3	Resultados da análise econômica .....	125
4.3.1	Orçamento.....	125
4.3.2	Valor anual economizado .....	127
4.3.3	Formação do fluxo de caixa .....	128
4.3.4	Análise do investimento.....	131
4.3.5	Análise de sensibilidade .....	132
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>140</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>144</b>
	<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>150</b>
	<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>151</b>
	<b>APÊNDICE C.....</b>	<b>153</b>
	<b>ANEXO.....</b>	<b>156</b>



# 1. INTRODUÇÃO

Este trabalho versa sobre uma temática bastante atual nas pautas nacionais e globais: a implementação de projetos de geração de energia solar fotovoltaica.

Ao longo das últimas décadas, a energia solar fotovoltaica vem sendo cada vez mais objeto de estudos e debates. No Brasil, apesar da posição privilegiada em relação à quantidade de radiação solar recebida, a participação dessa fonte na matriz energética nacional ainda é bastante incipiente. Apesar disto, existe um cenário bastante otimista em relação ao crescimento da inserção da fonte fotovoltaica no país, motivado principalmente pela redução dos custos de instalação e o aumento da tarifa de energia.

A energia fotovoltaica, além de se tratar de uma fonte segura, com reduzido impacto ambiental e isenta de emissão de CO<sub>2</sub> no processo de geração de energia, apresenta um relevante caráter econômico e social. Experiências firmadas no exterior comprovam que a cadeia produtiva dos sistemas fotovoltaicos apresenta uma elevada capacidade de geração de empregos (BERTASSO, 2016). Este fato possui grande relevância no cenário brasileiro atual, onde tem-se um alto índice de desemprego.

Uma das maiores formas de incentivo para a instalação de sistemas fotovoltaicos no Brasil, foi a Resolução Normativa nº 482 de 2012, posteriormente ampliada pela RN 687/2015. O incentivo é dado na forma de compensação de energia elétrica, ou seja, a energia gerada pelo sistema fotovoltaico pode ser injetada na rede de forma a reduzir a conta cobrada. Todas as concessionárias do país são obrigadas a aderir ao sistema de compensação, bem como atender os pedidos de conexão do sistema fotovoltaico à rede em tempo hábil.

Neste contexto, a instalação de um sistema fotovoltaico em uma universidade seria um grande atrativo e um grande incentivo aos alunos. O uso de fontes renováveis e o incentivo à ciência e tecnologia deve ser um valor intrínseco do meio universitário.

Além disso, tem-se como outra motivação para este trabalho a Chamada ANEEL nº 001/2016 – Projeto Prioritário de Eficiência Energética e Estratégico de P&D: Eficiência Energética e Minigeração em Instituições Públicas de Educação Superior. Esta Chamada busca selecionar projetos pilotos e demonstrativos em Instituições Públicas de Educação Superior, os quais servirão de referência para a formulação e a implementação de ações conjuntas e coordenadas em vários órgãos

e instituições públicas do país. Espera-se que a execução desses projetos forneça subsídios importantes para a formulação de políticas públicas de combate ao desperdício de energia elétrica em unidades consumidoras da administração pública (federal, estadual e municipal) (ANEEL, 2016).

Os projetos realizados no âmbito da referida Chamada possibilitarão a troca de equipamentos energeticamente ineficientes por outros mais eficientes, incentivando a mudança de hábito de consumo de professores, alunos e funcionários das instituições de ensino, além da implantação de minigeração de energia elétrica nas Instituições Públicas de Educação Superior, promovendo a redução nas contas de energia elétrica dessas instituições, assim como uma nova forma de gestão energética, por meio de ações de pesquisa, desenvolvimento e inovação, entre outras ações de capacitação profissional. Destaca-se ainda que criar uma cultura de Eficiência Energética na formação de futuros profissionais é de grande relevância para a sociedade como um todo (ANEEL, 2016).

Assim, escolheu-se o Instituto Central de Ciências, o principal prédio da Universidade de Brasília, para ser o objeto de estudo deste trabalho.

O Instituto Central de Ciências, além de possuir um imensurável valor histórico e arquitetônico, é o maior prédio da Universidade de Brasília, sendo frequentado por milhares de estudantes. Este prédio possui cerca de 720 metros de extensão, inúmeros departamentos e salas de aula, além de possuir 18 anfiteatros que são utilizados por diversos cursos.

Para dimensionar o sistema fotovoltaico a ser instalado no ICC, poderia se limitar o tamanho do projeto pela área disponível no telhado do prédio. Entretanto, por uma questão acadêmica, optou-se por realizar uma outra análise, projetando o sistema para suprir determinada carga do prédio e não apenas limitado pela área.

Desta forma, o sistema fotovoltaico em questão foi dimensionado para suprir o consumo de energia dos 18 anfiteatros do Instituto Central de Ciências, dada a relevância desses ambientes para a universidade.

Em prédios de ensino, a demanda maior é devido a carga de iluminação e ar-condicionado (MME, 2010). Sabe-se que o consumo de energia dos sistemas de ar-condicionado são dependentes de diversos fatores, como por exemplo a temperatura externa, o número de ocupantes, a carga de iluminação e etc. Para se obter o consumo de energia deste tipo de aparelho, ao invés de simplesmente multiplicar o valor de potência elétrica pelas horas de utilização, pode-se realizar uma simulação

termoenergética dos ambientes em análise, obtendo valores muito mais próximos da realidade.

Os programas para simulação termoenergética de edificações passaram a ser mais difundidos a partir da década de 70, após a crise do petróleo e proliferação dos microcomputadores pessoais. As ferramentas computacionais permitem a engenheiros e arquitetos analisar fenômenos complexos, como a transferência de calor em prédios. Geralmente, problemas deste tipo envolvem cálculos matriciais e iterações que dificultam a resolução manual. Dentre os diversos programas de simulação energética de edificações existentes, o DesignBuilder se destaca por ser bastante intuitivo e confiável. Com este software é possível simular o consumo de energia da edificação a partir de informações climáticas horárias da região, descrição arquitetônica e construtiva do prédio, padrões de uso e ocupação, potência instalada em iluminação, equipamentos e características do sistema de condicionamento de ar.

Apesar desta ferramenta ser utilizada em diversas universidades do mundo para avaliar o desempenho energético de edificações, ou partes dela, no departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília não consta nenhum trabalho realizado neste escopo, pelo menos trabalhos presentes no repositório institucional da Universidade de Brasília. Desta forma, o levantamento do consumo de energia elétrica dos anfiteatros do ICC por meio de uma simulação termoenergética se mostra um tema de grande relevância.

Referente aos sistemas de ar-condicionado presentes nos anfiteatros do Instituto Central de Ciências, diversos relatos de desconforto térmico nestes ambientes foram feitos por alunos e professores, inclusive através da imprensa, sendo a universidade até mesmo notificada pelo Ministério Público Federal para resolver este problema<sup>[1]</sup>.

A climatização das salas de aula é um aspecto importante para a melhoria do espaço pedagógico, já que busca manter os alunos em situação de conforto durante as aulas. O clima agradável colabora para o melhor rendimento dos alunos, pois o ambiente físico, como iluminação, temperatura, acústica e uso de cores influenciam no conforto físico e psicológico, influenciando, portanto, no processo de aprendizagem.

---

<sup>[1]</sup> Papel, caneta e leque: alunos da UnB sofrem com o calor em prédios sem ventilação. Disponível em: <https://www.metropoles.com/distrito-federal/calor-na-unb>. Acesso em 19 de novembro de 2018.

A partir destas considerações, este trabalho foi proposto para avaliar a viabilidade técnica e econômica da instalação de um sistema de geração fotovoltaica no telhado do Instituto Central de Ciências, projetado para suprir o consumo de energia dos anfiteatros do referido prédio. O consumo de energia anual dos anfiteatros foi obtido através da simulação termoenergética desses ambientes, considerando a correta operação dos sistemas de ar-condicionado de acordo com as normas vigentes.

## **1.1 Objetivo do trabalho**

### **1.1.1 Objetivo geral**

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a viabilidade técnica e econômica de um sistema fotovoltaico conectado à rede dimensionado para suprir o consumo de energia anual dos anfiteatros do Instituto Central de Ciências da Universidade de Brasília, sendo este valor de consumo obtido através de uma simulação termoenergética.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

Os objetivos específicos deste trabalho são listados a seguir:

- Levantar o consumo anual de energia elétrica dos anfiteatros do Instituto Central de Ciências da UnB através de uma simulação termoenergética utilizando o *software* DesignBuilder, levando em consideração que os sistemas de ar-condicionado operem regularmente;
- Projetar um sistema fotovoltaico conectado à rede, conforme o sistema de compensação energética estabelecido pela Resolução 482/2012, com a finalidade de suprir totalmente o consumo de energia dos anfiteatros do Instituto Central de Ciências;
- Comparar a energia injetada na rede pelo sistema fotovoltaico com o consumo de energia dos anfiteatros, obtido através da simulação termoenergética;
- Verificar a viabilidade financeira do projeto, estabelecendo um fluxo de caixa e utilizando parâmetros determinísticos de análise financeira.

- Realizar uma análise de sensibilidade dos parâmetros financeiros do projeto, avaliando os impactos das variações na viabilidade econômica do empreendimento.

## **1.2 Estrutura do trabalho**

Com o intuito de maximizar o entendimento do texto pelo leitor, o trabalho foi organizado em 5 capítulos. Ao final do texto, estão presentes os Apêndices do trabalho e um Anexo.

Após esta introdução, se inicia o Capítulo 2. Este capítulo visa expor ao leitor as referências bibliográficas necessárias para compreender o trabalho, contextualizando o projeto em âmbito global e nacional e expondo os principais conceitos utilizados, tanto em relação aos sistemas fotovoltaicos como em relação à simulação termoenergética.

O capítulo 3 refere-se aos métodos e materiais empregados para a obtenção dos resultados. Neste capítulo explicitam-se os passos tomados para o levantamento do consumo de energia dos anfiteatros através do software DesignBuilder e as considerações feitas, as etapas realizadas para o projeto do sistema fotovoltaico e a metodologia empregada na análise de viabilidade econômica do projeto. Ao final do capítulo, são expostos os materiais utilizados no trabalho, dando maior enfoque nos softwares PVSyst e DesignBuilder, utilizados no projeto fotovoltaico e na simulação termoenergética, respectivamente.

O capítulo 4 compila os resultados obtidos para a simulação termoenergética e para o projeto do sistema fotovoltaico, bem como sua viabilidade econômica. Nele encontram-se gráficos, tabelas e figuras que detalham os resultados obtidos. É neste capítulo que se concentram as principais contribuições deste trabalho, retomadas no quinto e último capítulo, que resume as conclusões obtidas através dos resultados, além de sugerir temas para trabalhos futuros baseado no que foi realizado neste.

Os apêndices e os anexos ao final trazem informações que não poderiam ser expostas ao longo dos capítulos pois afetariam a organização do texto. Nos apêndices são encontrados principalmente as tabelas utilizadas para a elaboração de gráficos inseridos no decorrer do trabalho. No anexo está presente o relatório gerado pelo *software* PVSyst para o sistema fotovoltaico projetado.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo contextualiza este trabalho mostrando o cenário global e nacional com o qual seu tema se relaciona. Ele expõe dados relevantes para o tema além de explicar os conceitos mais importantes para o entendimento do estudo aqui exposto.

### 2.1 Sustentabilidade e o cenário energético mundial

O conceito de sustentabilidade amplamente difundido nos dias atuais é a definição dada pela ONU, do relatório de Brundtland (1987): “A capacidade de satisfazer as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras satisfazerem suas próprias necessidades”. As mudanças climáticas observadas e relatadas nas últimas décadas incentivaram os países e as organizações mundiais a buscarem alternativas mais sustentáveis de desenvolvimento.

Das diversas iniciativas que ocorreram nas últimas décadas, destaca-se a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança Climática (UNFCCC), assinada no Rio de Janeiro no ano de 1992. Esta convenção tinha por objetivo estabilizar a concentração de gases de efeito estufa em um nível que diminua a interferência antrópica no sistema climático. Em 1997 foi assinado o Protocolo de Quioto, um tratado complementar que definiu metas de redução para os países participantes.

Em dezembro de 2015 foi assinado o Acordo de Paris, que está em vigor desde novembro de 2016, concretizando um acordo internacional do clima aplicado a 195 países. Tal compromisso entre as nações signatárias apresenta o objetivo de limitar o aumento da temperatura global, mantendo-a abaixo de 2°C e promovendo esforços para que permaneça inferior a 1,5°C (ONU, 2015).

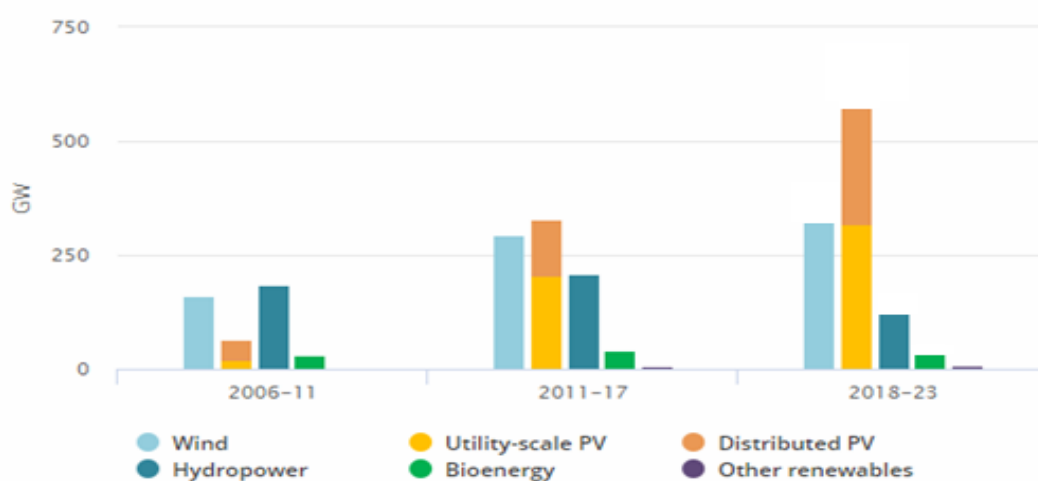
Ainda nesse contexto, surge a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável da ONU, um conjunto de 17 objetivos e 169 metas que constitui um plano de ação para as pessoas, o planeta e para a prosperidade, voltado para todos os países e partes interessadas atuarem em parceria colaborativa. Esta agenda tem como um dos principais objetivos proteger o planeta da degradação, sobretudo por meio do consumo e da produção sustentáveis, da gestão sustentável dos seus

recursos naturais e tomando medidas urgentes sobre a mudança climática, para que ele possa suportar as necessidades das gerações presentes e futuras. (ONU, 2015).

Com isto, é evidente a necessidade de ações concretas e em escala, principalmente no setor energético mundial, já que apenas esse setor é responsável por cerca de dois terços das emissões globais de gases de efeito estufa (IEA, 2018). Desta forma, o incentivo e a promoção de projetos que se beneficiem do uso de fontes renováveis de energia e da redução do consumo energético estão alinhados com os objetivos globais e, em maior ou menor escala, tais projetos contribuem para o alcance das metas mundiais de desenvolvimento e de redução dos impactos ambientais.

Em relação às fontes de energia renováveis, espera-se que esta forma de geração tenha o crescimento mais rápido no setor elétrico, fornecendo quase 30% da demanda de energia em 2023, ante 24% em 2017. Durante esse período, as energias renováveis deverão atender a mais de 70% do crescimento da geração global de eletricidade, liderado pela energia solar fotovoltaica, seguido por energia eólica, hidrelétrica e bioenergia. A energia hidrelétrica continua sendo a maior fonte renovável, atendendo 16% da demanda global de eletricidade até 2023, seguida pela energia eólica (6%), energia solar fotovoltaica (4%) e bioenergia (3%). Em termos de potência, espera-se que a capacidade das fontes renováveis cresça mais de 1 TW, um crescimento de 46% no período de 2018 a 2023. A geração solar fotovoltaica representa mais da metade desta expansão, impulsionada por políticas governamentais de apoio e melhorias de mercado na maioria das regiões (IEA, 2018).

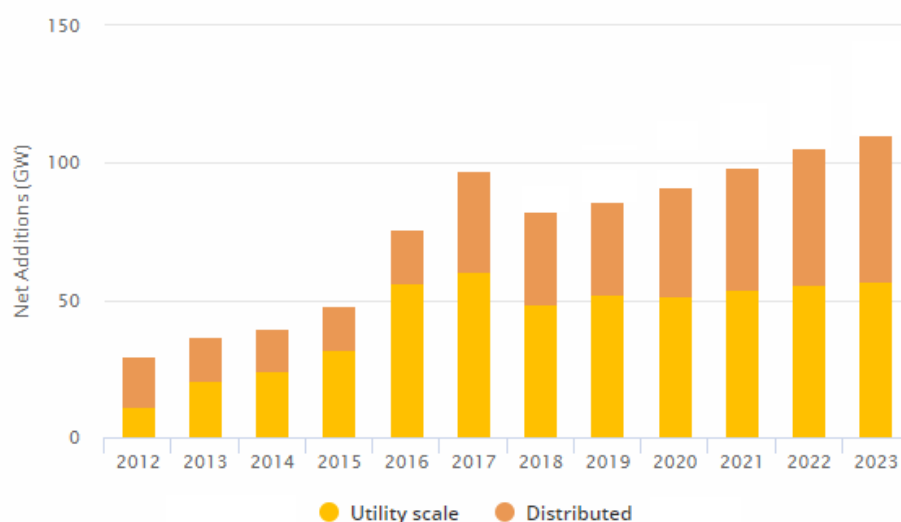
Figura 1 - Previsão de crescimento da capacidade das fontes de energia renovável.



Fonte: (IEA, 2018).

Espera-se que a fonte solar fotovoltaica domine o crescimento das capacidades de fontes de energia renovável nos próximos seis anos, com previsão de acréscimo de 575 GW neste período. Usinas fotovoltaicas representam 55% deste crescimento, enquanto o crescimento da geração distribuída acelera. Além disso, é previsto que um excesso global de oferta de módulos fotovoltaicos resulte em uma diminuição de preços, resultado do aumento da competitividade e das políticas públicas implementadas. As adições globais devem exceder 110 GW por ano até 2023, liderada pela China, Estados Unidos, Índia e Japão. O crescimento na América Latina e na África acelera devido à melhoria da atratividade econômica e forte apoio político (IEA, 2018).

Figura 2 - Aumento da capacidade da energia solar fotovoltaica, usinas fotovoltaicas e geração distribuída.



Fonte: (IEA, 2018).

## 2.2 Sistemas Fotovoltaicos no contexto brasileiro

O Brasil possui expressivo potencial para geração de energia elétrica a partir de fonte solar, contando com níveis de irradiação solar superiores aos de países onde projetos para aproveitamento de energia solar são amplamente disseminados, como Alemanha, França e Espanha.



Apesar dos altos níveis de irradiação solar no território brasileiro, o uso da fonte para geração de energia elétrica não apresenta a mesma relevância que possui em outros países, nem o mesmo desenvolvimento de outras fontes renováveis, como eólica e biomassa, que já representam, respectivamente, 8,3% e 9,1% da capacidade de geração instalada no Brasil, contra apenas 1,1% da fonte solar. (MME, 2018)

Embora o Brasil possua uma das matrizes mais renováveis do mundo, com aproximadamente 75% de fontes renováveis na oferta de energia elétrica, alcançar as metas firmadas se constitui grande desafio. Conforme Tolmasquim (2016), será necessário expandir o uso de fontes de energia não fóssil, aumentando a parcela de energias renováveis, além da energia hídrica, para ao menos 23% até 2030, principalmente pelo aumento da participação das fontes solar, eólica e biomassa.

Em setembro de 2018, o Brasil possuía cerca de 1750 MW de energia solar fotovoltaica instalada, mais de 4 vezes maior que o valor de setembro de 2017, de 419 MW. Dos 1750 MW existentes em 2018, 399 MW são referentes à geração distribuída e 1350 MW referentes à geração centralizada (MME, 2018).

A baixa utilização da energia solar no Brasil chama mais atenção quando se observa as condições favoráveis ao desenvolvimento da fonte no país. O Brasil possui altos níveis de insolação e grandes reservas de quartzo de qualidade, que podem gerar importante vantagem competitiva para a produção de silício com alto grau de pureza, células e módulos solares, produtos esses de alto valor agregado (EPE, 2012).

### ***2.2.1 Incentivos à utilização de sistemas fotovoltaicos no Brasil***

Apesar de a geração de energia solar fotovoltaica ainda ser relativamente recente no Brasil, existem diversos incentivos governamentais para o aproveitamento da fonte, conforme apresentado por Silva (2015), sendo que alguns dos incentivos são aplicados também para outras fontes renováveis de geração de energia elétrica. Os principais incentivos existentes são apresentados a seguir:

- Descontos na Tarifa de Uso dos Sistemas de Transmissão (TUST) e na Tarifa de Uso dos Sistemas de Distribuição (TUSD) para empreendimentos cuja potência injetada nos sistemas de transmissão e distribuição seja menor ou igual a 30.000 kW;

- Venda Direta a Consumidores Especiais (carga entre 500 kW e 3.000 kW) para geradores de energia de fonte solar e demais fontes renováveis, com potência injetada inferior a 50.000 kW;
- Convênio nº 101, de 1997, do Conselho Nacional de Política Fazendária (CONFAZ): isenta do Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) as operações que envolvem vários equipamentos destinados à geração de energia elétrica por células fotovoltaicas e por empreendimentos eólicos;
- Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infraestrutura (REIDI): suspende, por cinco anos após a habilitação do projeto, a contribuição para o PIS/PASEP e Cofins, no caso de venda ou de importação de máquinas, aparelhos, instrumentos e equipamentos novos, de materiais de construção e de serviços utilizados e destinados a obras de infraestrutura, entre as quais as do setor de energia;
- Condições Diferenciadas de Financiamento: Iniciativas como do BNDES, do Fundo Nacional sobre mudança do Clima (FNMC), Inova Energia e Caixa Econômica Federal (CEF), oferecem condições mais favoráveis para o financiamento de sistemas fotovoltaicos.
- Sistema de Compensação de Energia Elétrica para a Micro e Minigeração Distribuídas: instituído pela Resolução Normativa ANEEL nº 482, de 17 de abril de 2012, permite que consumidores com geração de até 5 MW a partir de fonte solar ou demais fontes renováveis compensem a energia elétrica injetada na rede com a energia elétrica consumida (sistema net-metering).

Percebe-se, portanto, grande número de incentivos para desenvolvimento da fonte solar no país. A partir dos incentivos concedidos, observa-se um avanço no desenvolvimento da geração solar fotovoltaica no Brasil. Ressalta-se que os projetos de geração fotovoltaica se dividem em projetos de geração centralizadas, ou seja, usinas de maior porte, e de geração descentralizada, ou distribuída, localizada em casas, edifícios comerciais e públicos, condomínios e áreas rurais.

Apesar do grande número de incentivos para desenvolvimento da geração solar fotovoltaica e dos resultados obtidos recentemente, ainda há muito que precisa ser feito para que a fonte solar se consolide na matriz energética nacional.

A seguir, será apresentada em maiores detalhes a Resolução Normativa ANEEL nº 482 de 2012, que posteriormente foi alterada pela Resolução Normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015, que se mostraram essenciais para a ampliação do uso de geração de energia solar fotovoltaico em unidades consumidoras.

### **2.2.2 Resoluções normativas nº 482/2012 e 687/2015 da ANEEL**

A Resolução nº 482/2012 estabelece condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, criando o sistema de compensação de energia. Para efeitos de diferenciação, a microgeração refere-se a uma central geradora com potência instalada igual ou inferior a 75 kW, enquanto que na minigeração, a potência instalada é superior a 75 kW e inferior a 3MW para fonte hídrica ou inferior a 5 MW para as demais fontes (ANEEL, 2016).

O sistema de compensação de energia elétrica definido na resolução trata-se de um arranjo no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com micro ou minigeração é cedida à distribuidora local e, posteriormente, compensada com o consumo de energia dessa mesma unidade consumidora ou de outra unidade consumidora de mesma titularidade e mesma área de concessão (sistema net-metering).

Os principais objetivos da resolução, além de estabelecer o acesso da micro e minigeração aos sistemas de distribuição de energia elétrica, é reduzir os custos e o tempo para conexão dos sistemas de energia distribuída, compatibilizar o Sistema de Compensação de Energia Elétrica com as Condições Gerais do Fornecimento (REN nº 414/2010), aumentar o público alvo e melhorar as informações na fatura de energia (ANEEL, 2016).

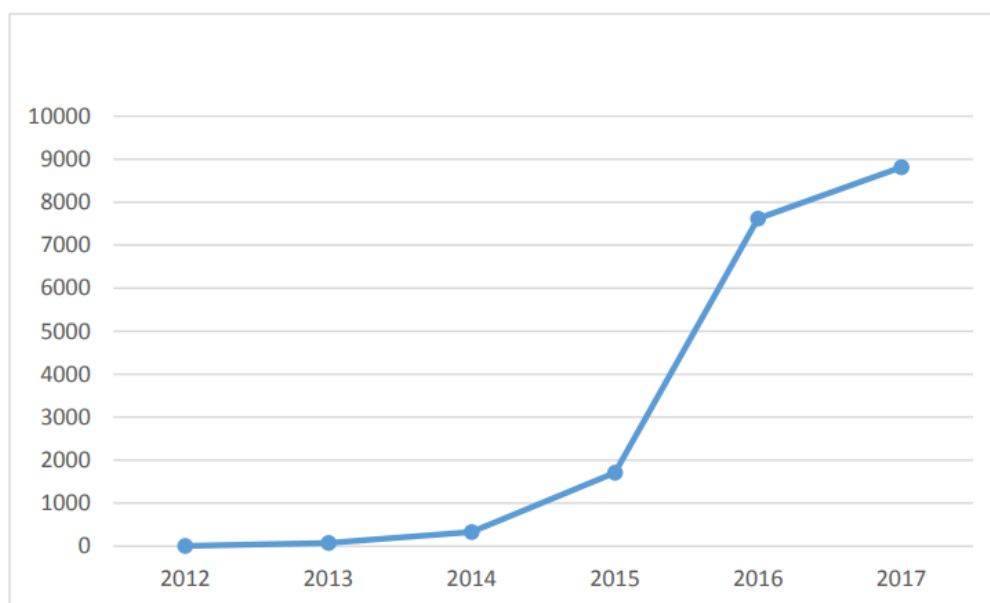
Além disso, no sistema de compensação, a energia injetada na rede gerará um crédito em quantidade de energia ativa que deve ser utilizado em até sessenta meses. Para se aferir o consumo e a geração da unidade consumidora é preciso adotar um sistema de medição bidirecional.

Com a Resolução nº 687, de 2015, criou-se a possibilidade de geração distribuída em condomínios (empreendimentos de múltiplas unidades consumidoras). Nessa configuração, a energia gerada pode ser repartida entre os condôminos em porcentagens definidas pelos próprios consumidores.

A mudança na regulamentação da ANEEL promoveu outro importante avanço: a figura da “geração compartilhada”, que possibilita a união de interessados em consórcios ou em cooperativas, instalando micro ou minigeração distribuída e dessa forma, utilizem a energia gerada para redução das faturas dos consorciados ou cooperados.

Nascimento (2017) mostra que, com o sistema de net-metering introduzido pela Resolução nº 482/2012, a geração distribuída de energia solar fotovoltaica começou de fato a avançar no país. A Figura 3 mostra a evolução do número de unidades consumidoras que participam do sistema de compensação de energia instituído pela referida Resolução.

Figura 3 - Unidades consumidoras com geração solar fotovoltaica entre 2012 e 2017.



Fonte: (NASCIMENTO, 2017).

Apesar do significativo crescimento, o número de unidades com geração fotovoltaica distribuída ainda é pequeno, principalmente se verificarmos o potencial brasileiro de aproveitamento da fonte e a forma como a fonte solar é aproveitada em outras partes do mundo. O Brasil possui atualmente cerca de 77 milhões de unidades consumidoras de energia elétrica. Portanto, apenas 0,01% das unidades

consumidoras, ou uma a cada dez mil, possuem painéis fotovoltaicos instalados (NASCIMENTO, 2017).

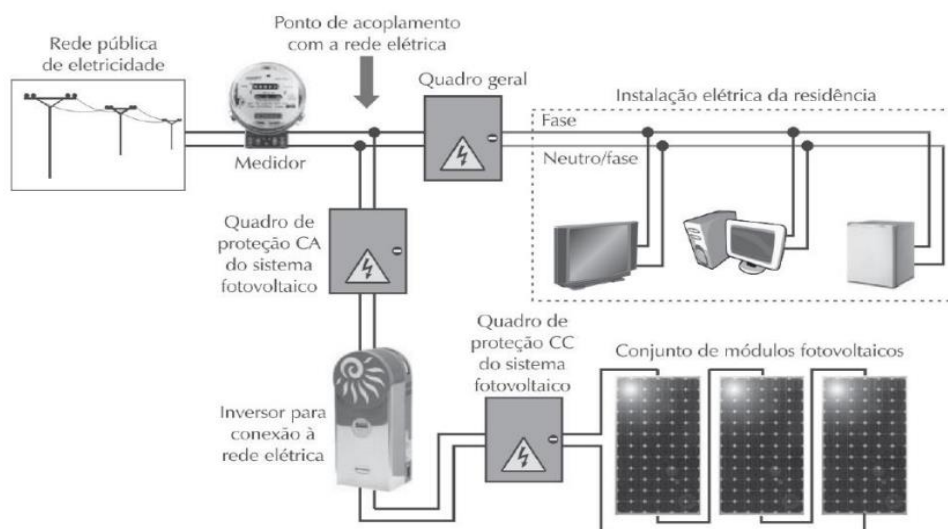
### **2.3 Principais componentes dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede**

Além dos sistemas conectados à rede, sujeitos às regulações impostas pelas resoluções normativas nº 482/2012 e 687/2015 da ANEEL, tem-se que os sistemas fotovoltaicos também podem ser autônomos, ou seja, isolados da rede. Nesse tipo de sistema, a energia produzida pelos módulos fotovoltaicos é armazenada em baterias, que por sua vez garantem o funcionamento do sistema em períodos com pouco, ou mesmo ausentes, de luz solar, como dias nublados ou à noite. Entretanto, por fugir do escopo deste trabalho, este tipo de sistema e suas principais características não serão detalhados.

Para sistemas fotovoltaicos conectados à rede, uma configuração típica é mostrada na

Figura 4 abaixo. Este sistema é composto por um conjunto de módulos fotovoltaicos, um inversor, quadros elétricos e um medidor de energia. Estes sistemas são modulares, ou seja, o conjunto de módulos e inversores podem ser acrescentados em paralelo de acordo com o tamanho do sistema fotovoltaico desejado. Ressalta-se a necessidade de dispositivos de proteção contra surtos e contra sobretensão, além de dispositivos seccionadores para melhor controle da instalação.

Figura 4 - Configuração típica de um sistema fotovoltaico conectado à rede.



Fonte: (VILLALVA e GAZOLI, 2013).

Os principais componentes são melhor detalhados a seguir:

- **Módulos fotovoltaicos:** Os termos módulo, painel e placa são usados indistintamente para descrever um conjunto de células fotovoltaicas encapsuladas conectadas eletricamente. Como as células produzem pouca eletricidade sozinha, há a junção de células em série e em paralelo, se fabricando o módulo. Com base na tensão em circuito aberto de uma placa, se insere outras em série até se encontrar a tensão requerida. Após se insere módulos em paralelo para se aumentar a corrente e assim se aumentar a potência da instalação (VILLALVA e GAZOLI, 2013).
- **Inversor:** A corrente gerada ao se utilizar módulos fotovoltaicos é contínua, porém, para que se tenha autorização para se conectar o sistema à rede é necessário que se tenha uma corrente alternada na frequência correta e com um nível de tensão condizente. É tarefa do inversor realizar esta adequação e este a realiza por meio de um chaveamento, transformando uma corrente contínua em uma aproximação de seno com ondas quadradas.

Além desta função, os inversores utilizados em instalações conectadas à rede possuem transformadores que adequam a tensão saída para a conexão com a rede. Tem-se também que o inversor sincroniza com a rede e protege a instalação em caso de sobretensão e

a queda desta. Por fim, alguns modelos apresentam MPPT (Maximum Power Point Tracker), um dispositivo que permite que em uma maior parte do tempo a operação seja realizada em máxima potência, possibilitando um aumento considerável na energia gerada.

- *String Box*: A caixa de junção, ou *String Box*, é um dispositivo que permite a ligação em paralelo de fileiras (*strings*). Nestes dispositivos, além de um barramento para a junção das fileiras, estão dispostos os dispositivos de proteção que impedem o fluxo de corrente de uma fileira para a outra, dispositivos para proteção do condutor e dispositivos de proteção contra surtos.

## 2.4 Projeto de sistemas fotovoltaicos

O projeto de um sistema fotovoltaico envolve a orientação dos módulos, disponibilidade de área, estética, disponibilidade do recurso solar, demanda a ser atendida e diversos outros fatores. Através do projeto pretende-se adequar o gerador fotovoltaico às necessidades definidas pela demanda.

O dimensionamento de um sistema fotovoltaico nada mais é que o ajuste entre a energia radiante recebida do sol pelos módulos fotovoltaico e a necessidade de suprir a demanda de energia elétrica. Para sistemas conectados à rede, as principais etapas do projeto de um sistema fotovoltaico são as seguintes (CRESESB, 2014):

- Levantamento adequado do recurso solar disponível no local da aplicação;
- Definição da localização e configuração do sistema;
- Levantamento adequado de demanda e consumo de energia elétrica;
- Dimensionamento do gerador fotovoltaico;
- Dimensionamento dos inversores;
- Projeto Elétrico.

Ressalta-se que, como não há padronização de características de saída dos módulos fotovoltaicos, e suas especificações elétricas dependem até mesmo da

tecnologia das células, a escolha de uma ferramenta computacional para o auxílio do projeto pode ser determinante na análise de viabilidade técnica e econômica de um projeto. A geração fotovoltaica caracteriza-se por um elevado investimento inicial, que pode ser significativamente reduzido com um projeto bem feito. A variabilidade e imprevisibilidade do clima e do recurso solar exigem um maior cuidado no dimensionamento (CRESESB, 2014).

#### ***2.4.1 Legislação e aspectos normativos a serem considerados no projeto fotovoltaico***

Relacionado a área de sistemas fotovoltaicos no Brasil, a Resolução Normativa 482 de 2012 da ANEEL e suas posteriores alterações estabelecem os critérios para o acesso de sistemas de micro e minigeração de energia à rede elétrica de distribuição e ao sistema de compensação de energia elétrica, conforme detalhado na seção 2.2.2.

A compensação de energia elétrica ocorre segundo o posto tarifário, sendo a potência do sistema instalado limitada, para consumidores do Grupo A, caso abordado neste trabalho, à demanda contratada.

O acesso ao sistema de distribuição, em Brasília, é normatizado pela Norma Técnica de Distribuição 6.09 da distribuidora local (CEB-D). Esta norma estabelece os critérios técnicos e os procedimentos necessários para que os consumidores façam a adesão ao sistema de compensação de energia, em conformidade com as recomendações regulatórias existentes para o assunto no setor elétrico nacional. Além disso, deve-se observar o módulo 3 do Prodist, que também trata do acesso ao sistema de distribuição.

Relativo ao projeto técnico do sistema fotovoltaico, a norma NBR 5410 deve ser seguida. Esta norma estabelece as condições a que devem satisfazer as instalações elétricas de baixa tensão, a fim de garantir a segurança de pessoas e animais, o funcionamento adequado da instalação e a conservação dos bens. Apesar de que muitos sistemas fotovoltaicos possuem tensão nominal bastante elevada, a norma citada abrange circuitos elétricos alimentados em corrente contínua de até 1500 V.

No ano de 2018, entrou em consulta pública a norma ABNT NBR 16690, que tratará sobre os requisitos de projeto para instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos, abordando disposições sobre os condutores, dispositivos de proteção



elétrica, dispositivos de manobra, aterramento e equipotencialização do arranjo fotovoltaico.

A norma NBR 16690 é de vital importância para o aspecto da engenharia elétrica, já que os requisitos de segurança que surgem das características particulares dos sistemas fotovoltaicos, em corrente contínua, trazem riscos além daqueles originados de sistemas de potência convencionais em corrente alternada, incluindo a capacidade de produzir e sustentar arcos elétricos com correntes que não sejam maiores do que as correntes de operação normais. Até o momento da realização deste trabalho, esta norma não foi publicada.

Cita-se ainda a norma NBR 16612, que especifica os requisitos mínimos para a qualificação e aceitação de cabos de condutor flexível para uso em corrente contínua em instalações de energia fotovoltaica, estabelecendo que os chamados “cabos solares”, específicos para sistemas fotovoltaicos, devem ser resistentes a altas temperaturas e à influência dos raios UV.

Outro aspecto a ser considerado neste trabalho é a questão do tombamento de prédios. O tombamento é um dos dispositivos legais que o poder público federal e estadual dispõe para preservar a memória nacional. Tem por finalidade proteger - por intermédio da aplicação de leis específicas - bens de valor histórico, cultural, arquitetônico, ambiental e também de valor afetivo para a população, impedindo que venham a ser destruídos ou descaracterizados (IPHAN, 2018).

## **2.5 Sistemas de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (AVAC)**

### **2.5.1 Conceitos relevantes**

- **Carga térmica:** Define-se como carga térmica a quantidade de energia que deve ser retirada de determinado ambiente para promover conforto térmico aos seus usuários. Essa energia é determinada pelo número de pessoas que utilizam a área, pelos aparelhos que emitem calor e pela posição do ambiente em relação ao sol.
- **Coeficiente de Performance (COP):** O COP de um equipamento é a razão entre o calor transferido e a energia externa utilizada. Para o COP de refrigeração, tem-se a seguinte equação:

$$COP = \frac{Q_e}{W_e} \quad (1)$$

Onde:

COP: Coeficiente de performance para o ciclo de refrigeração;

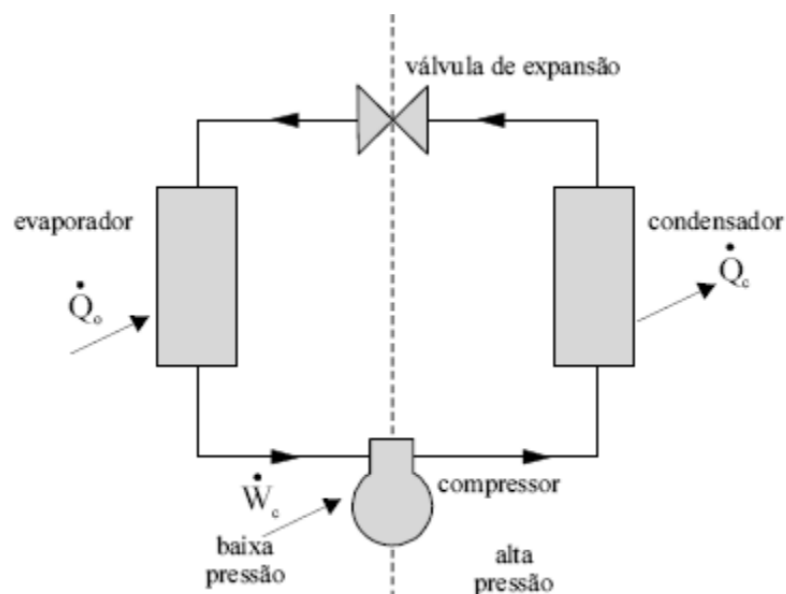
Q<sub>e</sub>: Calor transferido na refrigeração;

W<sub>e</sub>: Trabalho externo.

- Ciclo de refrigeração: Um ciclo de refrigeração é um sistema térmico que continuamente transfere energia térmica (calor) de uma região de menor para outra de maior temperatura. Como este fluxo contraria a tendência natural do calor, isso só é possível consumindo energia externa (BEYER, 2011).

Os componentes presentes em um ciclo de refrigeração básico são mostrados na Figura 5. São eles: evaporador, compressor, condensador e válvula de expansão. Nesse sistema, a refrigeração ocorre a partir da transferência de calor do meio onde a evaporadora se localiza para o meio onde a condensadora se localiza. Na evaporadora, o fluido de refrigeração, em um estado de mistura com baixo título de vapor, absorve o calor presente no ar do ambiente a ser refrigerado e evapora completamente. Em seguida, esse fluido, no estado gasoso, é aspirado para o compressor, onde é comprimido para vapor de alta pressão e temperatura. Logo em seguida, esse vapor passa pelo condensador, perde calor para o ambiente externo e condensa. Por fim, a válvula de expansão é responsável por expandir o fluido e deixa-lo novamente no estado de mistura com baixo título de vapor, completando o ciclo (BELTRAM, 2015).

Figura 5 - Diagrama de um ciclo de refrigeração básico.



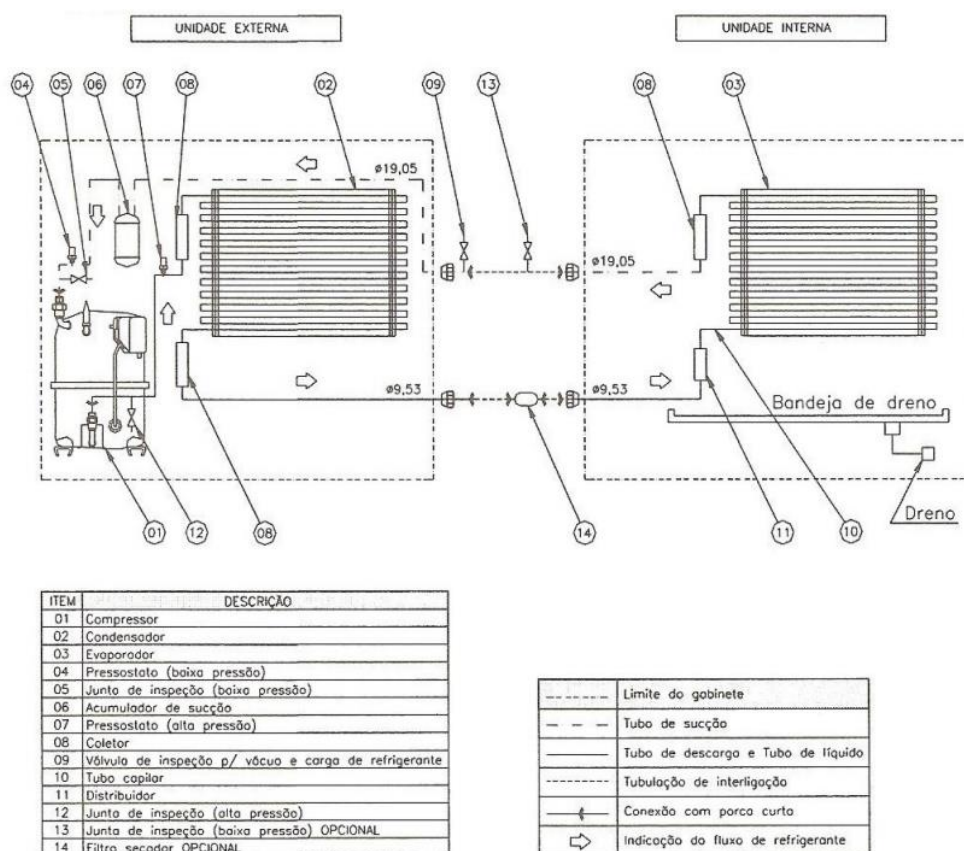
Fonte: (BELTRAM, 2015).

### 2.5.2 Tipos de sistemas de ar-condicionado

O mais simples tipo de sistema de ar-condicionado é o comumente conhecido como “Janela”. Nesse tipo de sistema, todos os equipamentos mostrados na Figura 5 estão montados em um único gabinete. Normalmente este tipo é utilizado em aplicações de carga térmica reduzida.

Outro tipo de sistema é o ar-condicionado Split, onde os componentes da Figura 5 são divididos em um gabinete interno, chamado de evaporador, e um gabinete externo, o condensador. Um maior detalhamento desse tipo de sistema é mostrado abaixo.

Figura 6 - Sistema tipo "split".



Fonte: (PROCEL, 2011).

Tem-se ainda o sistema do tipo Multisplit, onde um condensador central realiza a troca de calor com o ar externo para múltiplos evaporadores que compõe o sistema de ar condicionado.

Uma tecnologia que está cada vez mais difundida nos aparelhos do tipo Split é a utilização de um inversor de frequência para controlar a velocidade do motor do compressor, operando-o conforme a carga solicitada. Sem a utilização do inversor de frequência, o compressor opera utilizando um controle do tipo ON/OFF. Equipamentos que utilizam inversor de frequência são conhecidos como Splits Inverter. Com esta tecnologia, o consumo de energia elétrica é bastante reduzido.

Além destas classificações, os sistemas de ar-condicionado podem ser classificados de acordo com a troca de calor existente. A troca de calor entre o fluido e o ar pode ocorrer diretamente, que é o caso dos sistemas splits, multisplits e janela, ou indiretamente, através de um fluido intermediário, normalmente água. No caso indireto, tem-se os chamados sistemas de água gelada, justamente por utilizarem a

água como fluido intermediário. Neles, são utilizados *chillers* para realizar a troca de calor entre o fluido refrigerante e a água (BELTRAM, 2015).

### **2.5.3 Saúde e bem-estar em ambientes fechados**

Felix (2008) menciona que para alcançar o objetivo da realização de determinadas tarefas, as pessoas necessitam de uma sensação de bem-estar no ambiente em que se encontram, por esta razão, a grande maioria dos recintos fechados são climatizados artificialmente.

Os primeiros estudos sobre conforto térmico datam o início do século XX. Esses estudos tinham o objetivo principal de avaliar de que maneira as condições de temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do ar, afetavam o ser humano no desenvolvimento de suas tarefas. Os primeiros estudos nesta área foram desenvolvidos pela Comissão Americana de Ventilação em 1916 (FAGUNDES, 2016).

Lamberts (2004) descreve conforto térmico como o “estado mental que expressa a satisfação do homem com o ambiente térmico que o circunda”. A norma ASHRAE 55 cita que as maiores influências no conforto térmico de um ocupante é o metabolismo, a vestimenta, a temperatura do ar, a radiação térmica, a velocidade do ar e a umidade.

Segundo Seppanen (2006), o ser humano desenvolve melhor atividades intelectuais quando a temperatura está entre 21 e 25 °C. Mostra-se que a performance em ambientes de trabalho mostra diminuição no desempenho de 2% por grau celsius quando aumentada a temperatura no intervalo de 25 a 32 °C. Nico (2005) aponta que estudantes em um ambiente confortável podem melhorar seu desempenho no que tange a atenção, concentração e aprendizagem.

Além do conforto térmico, outro fator de suma importância é a Qualidade do Ar Interior (QAI). Sabe-se que uma série de poluentes - dentre eles, monóxido de carbono, dióxido de carbono, amônia, óxido de enxofre e nitrogênio - são produzidos dentro do edifício por materiais de construção baseados em solventes orgânicos, por materiais de limpeza, mofo, bolor, metabolismo humano e também pelas próprias atividades do homem. Tais poluentes comprometem a saúde e o rendimento do trabalho dos usuários (CARMO e PRADO, 1999).

Em ambientes com condicionamento de ar, os sistemas são projetados para fornecer ar com temperatura e umidade adequadas, livre de concentrações perigosas

de poluentes do ar, sendo que o processo mais complexo envolvido na ventilação é o mais importante na determinação de uma boa qualidade do ar interno.

A ventilação é uma combinação de processos que resultam não só no fornecimento de ar externo, mas também na retirada do ar viciado de dentro de um edifício. Estes processos envolvem normalmente a entrada de ar externo, condicionamento e mistura do ar por todas as partes do edifício e a exaustão de alguma parcela do ar interno. Em geral, um aumento da vazão na qual o ar externo é introduzido no ambiente interno provoca uma diminuição nos problemas relacionados à qualidade do ar interno (CARMO e PRADO, 1999).

A taxa na qual o ar externo deve ser introduzido no ambiente interno é especificada por normas, como a NBR 16401-3, por exemplo.

Ribeiro (2004) menciona que no ambiente escolar, os aspectos físicos têm grande impacto nas experiências de aprendizado e desenvolvimento.

#### **2.5.4 Legislação vigente**

Em 4 de janeiro de 2018 entrou em vigor a Lei 13.589, que torna obrigatória a execução de um Plano de Manutenção, Operação e Controle (PMOC) dos sistemas de ar-condicionado em edifícios de uso público e coletivo. Esta lei tem como objetivo garantir a boa qualidade do ar interior de estabelecimentos levando em conta padrões de temperatura, umidade, velocidade, taxa de renovação e grau de pureza, visando à eliminação ou minimização de riscos potenciais à saúde dos ocupantes.

Segundo a lei, o PMOC deverá obedecer a parâmetros regulamentados pela Resolução 9/2003 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (Anvisa) e posteriores alterações, assim como às normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

A resolução nº 9 da Anvisa dispõe sobre orientações técnicas sobre padrões referenciais de qualidade do ar interior em ambientes climatizados artificialmente de uso público e coletivo, no que diz respeito a definição de valores máximos recomendáveis para contaminação biológica, química e parâmetros físicos do ar interior, além de recomendar que os padrões referenciais adotadas pela resolução sejam aplicados aos ambientes climatizados de uso público e coletivo já existentes e aqueles a serem instalados.

A norma ABNT NBR 16401 – Instalações de ar-condicionado: Sistemas centrais e unitários, é dividida em três partes. A Parte 1, que trata do projeto das instalações, estabelece os parâmetros básicos e os requisitos mínimos de projeto para sistemas de ar-condicionado centrais e unitários, não se aplicando a pequenos sistemas unitários isolados, em que a soma das capacidades nominais das unidades que compõem o sistema é inferior a 10 kW.

A segunda parte da norma NBR 16401 trata dos parâmetros do ambiente interno que proporcionem conforto térmico aos ocupantes em recintos providos de ar-condicionado. Já a terceira e última parte, refere-se à qualidade do ar interior, especificando os parâmetros básicos e os requisitos mínimos para sistemas de ar-condicionado, visando à obtenção de qualidade aceitável de ar interior para conforto.

## **2.6 Simulação termoenergética**

Segundo Mendes (2005), o uso de simulações computacionais é imprescindível para o cálculo de indicadores de consumo de energia de edificações, pois permitem determinar o comportamento térmico e energético das construções.

Conforme afirma Clarke (2002), a simulação termoenergética surge para suprir a deficiência de estudos de consumo energético nas fases iniciais de projeto e de intervenção. A complexidade das interações presentes nos edifícios (como fluxo de energia e ocupação dos usuários) aliada à necessidade de retorno rápido do custo e do desempenho de diferentes alternativas de projeto são incentivos à sua aplicação prática.

O método da simulação computacional, apesar de ser uma simplificação da realidade, permite uma avaliação mais completa e representa melhor os fenômenos das trocas térmicas dentro do edifício e entre este e o meio externo, permitindo uma análise mais cuidadosa do seu desempenho energético. Os pré-requisitos do método de simulação trazem especificações quanto ao programa computacional a ser utilizado, o arquivo climático e a metodologia para modelagem da envoltória e dos sistemas do modelo.

Mendes (2005) menciona que através da simulação é possível estimar o consumo de uma edificação levando em consideração suas “características arquitetônicas, propriedades físicas dos materiais construtivos, cargas internas instaladas, sistemas de condicionamento do ar e padrões de uso e ocupação”, sendo

que os dados como temperatura, umidade relativa do ar, radiação solar e ventos, são geralmente obtidos através de arquivos de dados climáticos das 8760 horas do ano.

No estudo desenvolvido por Gómez et al. (1994), foram analisados os resultados obtidos com simulações e comparados com o consumo de energia medido a partir de leituras dos medidores pela concessionária local. O edifício analisado foi o Fórum de Santa Catarina, um edifício público localizado na cidade de Florianópolis.

Os autores apresentaram uma comparação entre os resultados medidos e simulados por usos finais de consumo de energia elétrica. Dessas comparações, observaram que para o sistema de iluminação não houve diferença entre os resultados medidos e simulados. Com relação ao consumo dos outros equipamentos, a diferença entre os valores medidos e simulados foi inferior a 10%. Quanto ao ar condicionado, o consumo de energia obtido com a simulação computacional foi superior ao consumo medido em aproximadamente 8%.

Um resultado interessante do estudo foi quanto às diferenças encontradas nos meses que não apresentam temperaturas muito altas ou muito baixas. Essas diferenças se deram devido ao uso aleatório do ar condicionado, o que não ocorreu nos meses quentes, onde foi possível assumir que os sistemas de condicionamento de ar funcionaram no horário de expediente. A diferença entre o caso simulado e o medido ficou sempre inferior a 10%.

Lee et al. (2001) verificaram a eficiência energética de um edifício através de simulação computacional. O estudo consistiu em uma auditoria energética em dois prédios do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), verificando, através de simulações, a eficiência de medidas adotadas para a otimização do uso da energia elétrica. As principais medidas adotadas para promover o uso eficiente da energia elétrica foram instalação de um sistema central de condicionamento de ar, elementos de proteção solar, aproveitamento da iluminação natural com a construção de prateleiras de luz, sistema de iluminação artificial composto por lâmpadas T8 de 32W, luminárias com refletor de alumínio de alta pureza e reatores com alto fator de potência.

Diversos autores indicam que decisões simples podem colaborar para o uso racional de energia elétrica. A especificação de equipamentos mais eficientes e a elaboração de um projeto adequado ao clima são medidas de baixo custo que deveriam ser colocadas em prática desde a fase inicial do projeto

Devido ao grande número de variáveis envolvidas no estudo do desempenho



energético de edificações, o programa simulador simplifica e colabora nas análises que se deseja realizar. Basicamente, os softwares de simulação computacional se fundamentam em uma série de informações de entrada fornecidas pelo usuário para realizar suas rotinas de cálculo (ANDRADE, 2016).

Os itens a seguir identificam estes dados:

- Envoltória do edifício: a modelagem de um edifício pode ser criada em módulos de construção CAD (Computer Aided Design), ou através da inserção de dados por sistema de coordenadas. Vale ressaltar que muitos softwares não possuem módulo de construção CAD, porém realizam a importação de formatos de arquivos de desenho tridimensional desenvolvidos em outras plataformas;
- Composição do edifício: a caracterização da construção é dada pelo detalhamento e propriedades físicas dos materiais externos e internos utilizados na construção;
- Informações de utilização: a descrição dos equipamentos utilizados em um edifício e o perfil de ocupação;
- Condições externas: são inseridos arquivos externos com dados sobre o perfil dos climas ambientais na região geográfica da edificação.

A análise termoeenergética de uma edificação é bastante complexa devido ao número de variáveis interdependentes e requer conhecimentos multidisciplinares. O uso de um software torna possível o desenvolvimento de modelos que representam o comportamento das edificações e permite a simulação de diferentes cenários. É possível, através dos softwares, avaliar um grande número de alternativas construtivas, do sistema de iluminação ou de sistemas de condicionamento de ar, e estimar o consumo, custo e impacto ambiental de cada uma das alternativas.

Através de simulações termoeenergéticas é possível conhecer o comportamento de cada parâmetro construtivo e também abordar de forma integrada os sistemas naturais e artificiais de condicionamento e de iluminação, respondendo mais adequadamente às condicionantes do clima e da função do edifício (LAMBERTS et al., 1997).

Dentre os diversos softwares existentes, o que mais se destaca na atualidade é o EnergyPlus. Ele é um programa computacional gratuito e foi desenvolvido da fusão dos programas Building Loads Analysis and System Thermodynamics (BLAST) e

Department of Energy, EUA (DOE-2), que foram criados no final dos anos 70 para simulação numérica de desempenho energético e dimensionamento de sistemas de climatização. Foi uma iniciativa do Departamento de Energia dos Estados Unidos.

## 2.7 O Instituto Central de Ciências

O Instituto Central de Ciências (ICC) é o principal prédio acadêmico da Universidade de Brasília. Desenhado por Oscar Niemeyer, originalmente estava prevista a construção de dois auditórios para quinhentas pessoas e a criação de uma série de laboratórios na área central, que não puderam ser construídos por causa da ocupação do subsolo por salas de aula e pela pista.

A construção durou cerca de oito anos. Iniciou-se em 1963 e ficou pronta em 1971. O prédio começou a ser ocupado quando a estrutura ficou pronta, inicialmente pela psicologia e pela biologia. Como a universidade não tinha recursos para fazer outros edifícios, resolveu-se colocar no ICC as áreas que precisavam de mais espaço. Abriga sete institutos (de Ciências Exatas, de Ciências Humanas, de Ciências Sociais, de Física, de Geociências, de Letras e de Psicologia) e três faculdades (de Comunicação, de Agronomia e Veterinária e de Arquitetura e Urbanismo) (FONSECA, 2007).

Figura 7 - Vista aérea do Instituto Central de Ciências da Universidade de Brasília.



Fonte: Beto Viana.

O ICC atualmente possui cerca de 720 metros de extensão. Pode ser dividido entre as alas Norte, Central e Sul. As entradas principais são grandes pontos de encontro da comunidade acadêmica entre os intervalos das aulas e foram apelidadas pelos próprios alunos de *Ceubinho* - entre a Ala Norte e Central - e de *Udefinho* - entre a Ala Central e Sul. Também há acessos pelo extremo norte e extremo sul, além do acesso à rua de serviço.

O ICC também se divide em três blocos (A, B e C). Os blocos A e B possuem três pisos (subsolo, térreo e mezanino). No subsolo, entre os blocos A e B estão a rua de serviço e o bloco C cujo teto contém jardins e passarelas no nível do térreo.

Além das inúmeras salas e laboratórios, destacam-se os anfiteatros do ICC. Atualmente, são 18 anfiteatros que se localizam no bloco B do prédio, sendo que nove se encontram na ala sul do ICC (anfiteatros 2 a 10) e nove na Ala Norte (anfiteatros 11 a 19). Os anfiteatros são um dos principais ambientes do prédio, sendo que milhares de estudantes transitam por eles no decorrer dos semestres letivos.

No ano de 2012, 15 dos 18 anfiteatros foram reformados, onde foram instalados sistemas de ar-condicionado e as entradas de ar para ventilação foram tampadas. Desta forma, quando os sistemas de ar-condicionado destes ambientes não operam, relatos de desconforto térmico são recorrentes tanto por parte dos alunos como dos professores.

Figura 8 - Foto de um dos anfiteatros do ICC.



Fonte: PPGCOM/FAC. Disponível em: <http://ppgcom.fac.unb.br/corpo-docente/>. Acesso em 18 de novembro de 2018.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo visa descrever o método utilizado para o desenvolvimento do trabalho proposto, além dos materiais utilizados. O objetivo desta sessão é detalhar os passos seguidos e as considerações realizadas no desenvolvimento do trabalho a fim de que ele possa ser avaliado e reproduzido.

Neste trabalho, realizou-se o projeto de um sistema fotovoltaico conectado à rede para suprir parcialmente o consumo de energia do Instituto Central de Ciências da Universidade de Brasília. O valor de consumo de energia dos 18 anfiteatros do ICC foi utilizado para dimensionar o sistema fotovoltaico projetado, sendo que este valor de consumo foi obtido através da simulação termoenergética dos referidos ambientes, levando-se em consideração a correta operação de todos os seus sistemas de ar-condicionado. A viabilidade técnica e econômica do sistema fotovoltaico projetado foi analisada.

Este estudo foi realizado em três etapas, sendo elas descritas a seguir.

A primeira etapa consiste na realização da simulação termoenergética dos anfiteatros do ICC. A fim de se realizar uma representação tridimensional do Instituto Central de Ciências e de seus anfiteatros no software DesignBuilder, realizou-se a coleta de dados construtivos destes ambientes. Em seguida, com dados da iluminação, ocupação e dos sistemas de ar-condicionado, foi possível simular o consumo de energia elétrica de todos os anfiteatros, obtendo-se a energia consumida e o comportamento de suas cargas no decorrer do ano.

Na segunda etapa, foi avaliada a viabilidade técnica de se implantar um sistema fotovoltaico para suprir o consumo de energia estipulado, instalando-o no telhado do Instituto Central de Ciências. Foi realizado o estudo de sombreamento deste prédio no software SketchUp, encontrando-se a área disponível para a instalação do sistema. Em seguida, foi feito o dimensionamento do sistema fotovoltaico através do software PVsyst, obtendo-se então a estimativa da energia gerada pelo sistema. Por fim, foi realizado o projeto elétrico do sistema, atentando-se às normas vigentes.

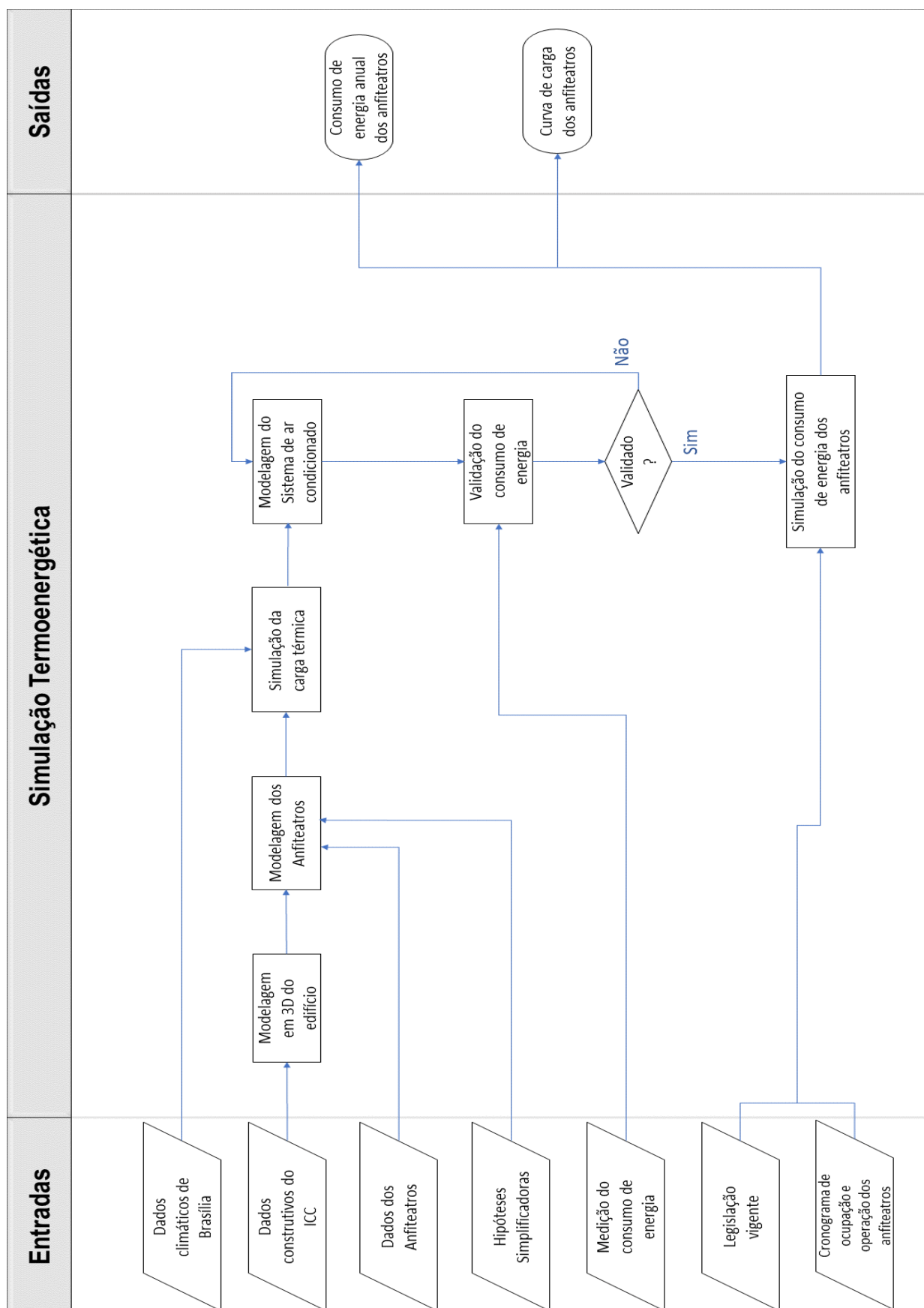
Na terceira etapa do trabalho, foi realizada a avaliação econômica do projeto proposto, seguido de um estudo de sensibilidade, no qual variou-se os principais parâmetros e através de indicadores econômicos foi possível realizar uma comparação entre diversos cenários.

Por fim, serão apresentados os materiais utilizados no trabalho, dando enfoque maior no *software* DesignBuilder, utilizado na simulação termoenergética, e no *software* PVSyst, utilizado no projeto do sistema fotovoltaico.

### **3.1 Metodologia para a simulação termoenergética**

Para a simulação termoenergética, foi adotada a metodologia presente no fluxograma da Figura 9 abaixo.

Figura 9 - Fluxograma para a Simulação Termoenergética.



### **3.1.1 Delimitação do escopo da simulação**

O Instituto Central de Ciências é um prédio com cerca de 720 metros de extensão, inúmeros ambientes e incontáveis variáveis relevantes para uma simulação termoenergética.

Como explicado anteriormente, o sistema fotovoltaico a ser projetado será dimensionado para suprir o consumo de energia anual dos 18 anfiteatros do ICC. Como somente estes ambientes são de interesse para o trabalho, será feita uma modelagem com maior detalhamento dos anfiteatros, sendo que as outras salas e ambientes do Instituto Central de Ciências não serão modeladas se não possuírem influências no escopo da simulação.

### **3.1.2 Coleta de dados**

Para realizar a simulação do Instituto Central de Ciências da Universidade de Brasília, foram requeridas ao Ceplan-UnB (Centro de Planejamento Oscar Niemeyer) as plantas baixas do prédio em questão. Foram disponibilizadas pela universidade as plantas arquitetônicas de todo o prédio, além dos projetos de iluminação e dos sistemas de ar condicionado dos anfiteatros.

Além das plantas baixas obtidas, foi necessário contar o número máximo de ocupantes de cada anfiteatro e verificar se havia discrepâncias entre o projeto elaborado com o que foi realmente executado.

Foram obtidos ainda os dados climáticos de Brasília que serão utilizados tanto na simulação termoenergética como no projeto fotovoltaico. Estes dados são provenientes dos arquivos climáticos “INMET 2016”, disponibilizados no website do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina.

### **3.1.3 Hipóteses simplificadoras**

Para a realização da simulação termoenergética, diversos parâmetros e considerações devem ser levados em conta. Como o Instituto Central de Ciências é um prédio muito grande, com diversas salas e laboratórios, e, como o escopo do trabalho se limita ao estudo dos anfiteatros do referido prédio, diversas hipóteses

foram consideradas a fim de se simplificar a simulação termoenergética destes ambientes sem haver prejuízo aos resultados obtidos.

Desta forma, as seguintes hipóteses foram consideradas na modelagem dos anfiteatros do ICC:

- A única influência do bloco A do prédio sobre a carga térmica do bloco B, onde se encontram os anfiteatros, se dá no sombreamento;
- Os materiais constituintes das envoltórias construtivas dos ambientes modelados, como paredes, teto e piso, não possuem grande influência em suas cargas térmicas. As maiores influências são os ganhos internos dos ambientes, como ocupação e equipamentos;
- O subsolo do Instituto Central de Ciências e as salas presentes em seu mezanino não possuem grande influência sobre a carga térmica dos anfiteatros;
- Anfiteatros que possuam aproximadamente a mesma carga térmica e os mesmos equipamentos elétricos, podem ser modelados apenas uma única vez, sendo os resultados obtidos para estes ambientes atribuídos a todos os seus semelhantes;
- Considerando o consumo de energia elétrica, múltiplos sistemas de ar condicionado presentes em um mesmo ambiente podem ser modelados como apenas um único sistema centralizado.

#### **3.1.4 Modelagem em 3D do prédio**

A partir das plantas baixas disponibilizadas, modelou-se no *software* DesignBuilder uma versão simplificada do Instituto Central de Ciências. Foram utilizados blocos simples para simular os locais que se situam os anfiteatros, ou seja, o bloco B do ICC. Os blocos simples são aqueles capazes de modelar zonas térmicas em seus interiores. Foram utilizados 7 destes blocos em todo o prédio, sendo 1 para o subsolo inteiro, 3 blocos para o térreo da parte Sul, Central e Norte do prédio, e outros 3 blocos para os mezaninos.

Para modelar o bloco A do prédio, que não possui anfiteatro, foram utilizados blocos componentes. Este tipo de bloco não admite a inserção de zonas térmicas em seus interiores, são adiabáticos e são inseridos na simulação apenas para os cálculos



relacionados aos efeitos de sombreamento. Estes blocos também foram considerados para modelar o telhado do ICC e as vigas presentes em todo o prédio. Ressalta-se que o telhado do prédio possui influência irrelevante no comportamento térmico dos anfiteatros.

Em seguida, o lado norte do prédio foi orientado para 345°. Este valor foi obtido através do software Google Earth. A orientação correta do prédio é relevante para a consideração dos efeitos da incidência de radiação solar e da direção dos ventos durante o ano.

Por fim, considerando que os ganhos internos correspondem à maior parte na carga térmica dos ambientes, pode-se dizer que os materiais constituintes das envoltórias construtivas dos ambientes modelados, como paredes, teto e piso, não possuem grande influência nesta carga. Sendo assim, para a modelagem das envoltórias do prédio, utilizou-se o template de construção “Medium Weight, Moderate Insulation”, disponível no próprio software e utiliza paredes de tijolo e concreto, semelhante à construção do Instituto Central de Ciências.

### **3.1.5 Modelagem dos anfiteatros**

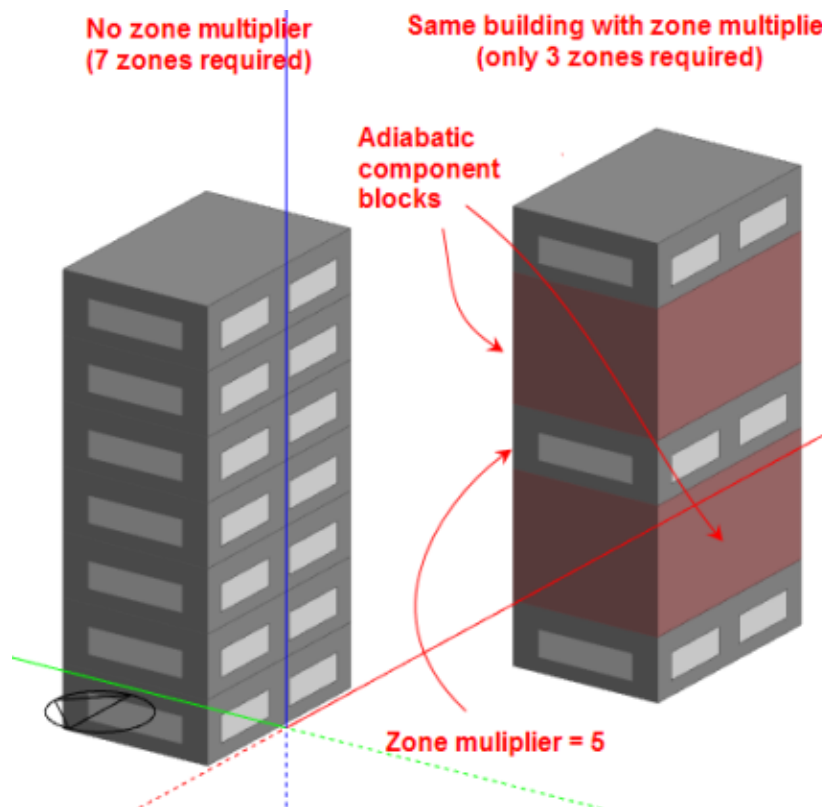
Após realizar a modelagem da envoltória externa do ICC, foram utilizadas as plantas baixas dos anfiteatros disponibilizadas pelo CEPLAN – UnB e outros dados coletados sobre estes ambientes para realizar a modelagem tridimensional dos anfiteatros no software DesignBuilder.

Dos 18 anfiteatros presentes no prédio, realizou-se a modelagem de apenas cinco deles, os anfiteatros 2, 3, 4, 7 e 11. Observou-se que todos os outros anfiteatros presentes no Instituto Central de Ciências se assemelham em tamanho físico, ocupação máxima, carga de iluminação e sistema de ar condicionado a um destes cinco. Considerando que os padrões de uso dos anfiteatros também são semelhantes, pode-se simplificar a modelagem utilizando o recurso “Zone Multiplier” do software, no qual os resultados obtidos para o ambiente modelado são multiplicados pelo número de ambientes que são semelhantes a ele.

Este recurso é muito utilizado em simulações termoenergéticas, sendo inclusive sugerido pelo manual do software para prédios com muitos ambientes semelhantes. Na Figura 10, tem-se um exemplo do uso deste recurso. Neste exemplo, um prédio de 7 andares, com todos os ambientes semelhantes, pode ser modelado como apenas

3 zonas térmicas. O térreo, por estar em contato com o solo, e a cobertura, por estar mais exposto à radiação solar, são modelados normalmente. Os 5 andares entre eles podem ser modelados como apenas uma zona térmica, sendo os resultados obtidos para o ambiente modelado atribuídos aos outros 4 andares, sem causar prejuízos aos resultados.

Figura 10 - Exemplo do uso do recurso "Zone Multiplier" no software DesignBuilder.



Fonte: (DESIGNBUILDER, 2016)

Na modelagem dos anfiteatros escolhidos, foram utilizados 2 blocos sobrepostos verticalmente, um a nível térreo e outro no subsolo. Realizou-se um buraco entre eles, interligando os dois blocos, e modelando o ambiente como apenas uma zona térmica. Além disso, foi simulada a antecâmara do anfiteatro. As dimensões destes ambientes foram modeladas de acordo com o projeto arquitetônico disponibilizado. Ressalta-se que estes anfiteatros não possuem janelas ou entradas de ar além das portas, com exceção do anfiteatro 11, que não possui sistema de ar condicionado.

Além dos anfiteatros, julgou-se necessária a modelagem de suas salas adjacentes no nível térreo, a fim de se obter uma melhor simulação do comportamento

destes ambientes.

O subsolo e o mezanino do Instituto Central de Ciências são ambientes de extrema complexidade para a modelagem. Além da alta quantidade de detalhes, estes ambientes são muito grandes e ventilados naturalmente. Devido a isto, optou-se por considerar que estes ambientes possuem temperaturas semelhantes às temperaturas externas, desprezando-se a necessidade da modelagem mais detalhada dos complexos ambientes do subsolo e do mezanino, e evitando possíveis distorções nos ambientes em análise.

### **3.1.6 Simulação da carga térmica**

Com os anfiteatros modelados tridimensionalmente, deve-se verificar se os ambientes simulados estão de acordo com os ambientes reais. Para realizar esta verificação é necessário realizar o cálculo da carga térmica dos ambientes modelados.

No software DesignBuilder, o cálculo da carga térmica dos ambientes simulados é baseado no pior dia do ano, o chamado dia de projeto. Este dia é definido a partir dos dados climáticos inseridos no software, sendo que, para Brasília, este dia ocorre no mês de outubro.

A partir da carga térmica calculada, o programa sugere a potência do sistema de ar condicionado que deve ser instalado neste ambiente para atingir as especificações de conforto térmico determinadas pelo projetista. A sugestão baseia-se em normas da ASHRAE, dimensionando um sistema 15% maior que a carga térmica do ambiente.

Para a escolha dos parâmetros, a norma ABNT NBR 16401 foi utilizada. Esta norma foi elaborada com base nas normas técnicas da ASHRAE, que leva em consideração uma série de detalhes, desde o local e posicionamento dos prédios, materiais usados na construção, aspectos arquitetônicos e ocupação dos ambientes, incluindo, portanto, um amplo detalhamento de informações sobre o ambiente estudado.

Para o cálculo da carga térmica, deve-se definir as cargas relevantes para cada ambiente. Foram levadas em consideração as cargas provenientes da ocupação e da iluminação. Os valores utilizados baseiam-se nos projetos disponibilizados dos anfiteatros e em verificações nos referidos locais.

Tabela 1 - Dados dos anfiteatros considerados no cálculo da carga térmica

<b>Local</b>	<b>Número máximo de ocupantes</b>	<b>Potência de iluminação (W)</b>
Anfiteatro 2	105	2116
Anfiteatro 3	128	2828
Anfiteatro 4	198	3440
Anfiteatro 7	147	2900

Para o cálculo da carga térmica deve-se considerar a pior condição possível. Sendo assim, considerou-se que cada anfiteatro está com sua lotação máxima das 8 às 18 horas.

Nesta simulação, foi considerado que todos os ocupantes dos anfiteatros estão sentados. Utilizou-se o valor de taxa metabólica da norma NBR 16401-1, de 130 W por pessoa. Além disso, tem-se que homens, mulheres e crianças possuem taxas metabólicas distintas, sendo 100% do valor do ganho para homens, 85% para mulheres e 75% para crianças. Foi considerado um fator de 90%, por sugestão da própria norma. A proporção entre calor sensível e latente também foi considerada segundo a norma.

A carga de iluminação foi modelada como lâmpadas fluorescentes, embutidas no teto e, utilizando os valores recomendados pelo programa, com 18% de fração visível, 45% de fração convectiva e 37% de fração radiante. O valor de 300 lux foi inserido baseando-se na norma citada e os valores de potência para cada anfiteatro foram inseridos.

Para o cálculo da carga térmica, determinou-se que o ambiente deveria ser resfriado para 23°C, considerando a temperatura de operação do ambiente. A temperatura de operação é uma medida simplificada de conforto térmico que leva em consideração a temperatura do ar, a temperatura média radiante e a velocidade do ar. O valor de 23° C é razoável para fornecer conforto térmico aos ocupantes em diversas situações. Os detalhes relacionados ao conforto térmico em ambientes climatizados não serão abordados por se tratarem de um tema que foge ao escopo do trabalho.

Além disso, adicionou-se uma infiltração de ar externo no ambiente de 0,3 ac/h (trocas de ar por hora), valor sugerido pelo software DesignBuilder. Tem-se ainda que as portas dos anfiteatros foram consideradas abertas 100% do tempo, permitindo a

entrada e saída de ar, assim como ocorre na realidade.

Referente à renovação de ar dentro dos ambientes climatizados, a Tabela 1 da norma NBR 16401-3 foi utilizada. Tem-se que para ambientes definidos como salas de aula, a fração de ar exterior relacionada às pessoas é de 7,5 litros por segundo por pessoa, enquanto a fração de ar exterior relacionada ao recinto é de 0,9 Litros por segundo por metro quadrado. Na norma, estes valores são referentes ao Nível 3, onde existem estudos que evidenciam a redução de reclamações e manifestações alérgicas pelos ocupantes.

O controle de umidade do ambiente não foi simulado, já que os sistemas de ar condicionado presentes nos anfiteatros não apresentam esta função.

Na tabela a seguir são expostos os parâmetros utilizados na simulação da carga térmica.

Tabela 2 - Valores utilizados para o cálculo da carga térmica dos anfiteatros

Ambiente	Área (m <sup>2</sup> )	Pessoas	Pessoas/m <sup>2</sup>	Renovação de ar (L/s)	Iluminação	
					Lux	W/m <sup>2</sup>
Anfiteatro 2	219,41	105	0,479	984,97	300	9,64
Anfiteatro 3	229,45	128	0,558	1166,51	300	12,33
Anfiteatro 4	314,97	198	0,629	1768,47	300	10,92
Anfiteatro 7	233,35	147	0,630	1312,52	300	12,43

Em relação às salas de aula adjacentes aos anfiteatros em nível térreo, as suas dimensões físicas foram modeladas de acordo com a realidade, mas a quantidade de carga de iluminação e número de ocupantes foram simuladas utilizando templates para salas de aula do próprio software. A modelagem mais detalhada destas salas é desnecessária, já que alterações produzidas resultam em efeitos irrisórios nos dados que queremos obter dos anfiteatros.

Com estas considerações, o cálculo das cargas térmicas dos Anfiteatros 2, 3, 4 e 7 foram realizados e o resultados obtidos. Ressalta-se que o anfiteatro 11 não possui sistema de ar condicionado, sendo esta simulação desnecessária para o referido ambiente.

Comparando a potência do sistema sugerido pelo software para os anfiteatros com a potência dos sistemas instalados de fato, pode-se verificar se a modelagem tridimensional está coerente com a realidade.

### 3.1.7 Modelagem dos sistemas de ar condicionado

A partir dos dados coletados, foi possível modelar os sistemas de ar condicionado presentes nos anfiteatros simulados. Na tabela abaixo, são mostradas as especificações técnicas dos aparelhos em questão.

Tabela 3 - Especificações técnicas dos sistemas de ar condicionado nos anfiteatros simulados.

Anfiteatro	Tipo de sistema	Capacidade do sistema (BTU/h)	Marca	Potência elétrica total (W)	COP (W/W)
Anfiteatro 2	Split Cassete	4 x 36000	Carrier	4 x 3540	2,98
Anfiteatro 3	Split Cassete	4 x 48000	Carrier	4 x 4720	2,98
Anfiteatro 4	Evaporadora + Trocador de Calor + Módulos condensadores	288000	Trane	31400	2,80
Anfiteatro 7	Split Cassete	4 x 48000	Carrier	4 x 4720	2,98

No anfiteatro 2, tem-se um sistema constituído por 4 aparelhos do tipo Split Cassete de 36000 BTU/h, totalizando 144 000 BTU/h de potência para este ambiente. Nos anfiteatros 3 e 7 os sistemas idênticos, sendo eles constituídos por 4 aparelhos do tipo Split Cassete de 48 000 BTU/h, que totalizam 192 000 BTU/h de capacidade nestes anfiteatros.

O software DesignBuilder não permite a atribuição de mais de um sistema de ar condicionado por zona térmica. Desta forma, para realizar a simulação do consumo de energia de todo o sistema, os aparelhos foram agrupados como sendo apenas um, centralizado. Como nestes anfiteatros os aparelhos são da mesma marca e modelo, com a mesma capacidade e a mesma potência elétrica, igualmente espaçados entre si, pode-se realizar esta simplificação sem acarretar grandes mudanças nos resultados obtidos.

Desta forma, agrupando os 4 aparelhos em apenas um, cria-se um sistema split de 144 000 BTU/h de capacidade e 14,16kW de potência elétrica no anfiteatro 2 e um sistema split de 192000 BTU/h de capacidade e 18,88kW de potência elétrica nos anfiteatros 3 e 7.

No anfiteatro 4 tem-se um sistema composto por uma evaporadora, um módulo trocador de calor e dois módulos condensadores, conhecido popularmente como “Splitão”. O funcionamento deste tipo de sistema é bastante semelhante aos sistemas do tipo split, podendo ele ser modelado no software também como um ar condicionado do tipo split.

No DesignBuilder, foi utilizado o template de ar condicionado “Split + Separate mechanical ventilation” do próprio software para modelar os aparelhos presentes nos anfiteatros em questão. As capacidades dos aparelhos e seus COP foram alterados para coincidir com as dos aparelhos reais.

Neste template, além do sistema de ar condicionado, é modelado um sistema de ventilação mecânica, que será o responsável pela renovação de ar do ambiente.

Entretanto, este modelo apresenta uma limitação. Para os sistemas presentes nos anfiteatros 2, 3 e 7, a caixa de ventilação responsável pela renovação do ar no ambiente possui uma vazão nominal de 1360 m<sup>3</sup>/h. Este valor para os ambientes é muito baixo, se mostrando insuficiente para atender as condições de conforto térmico especificados, o que resulta em um erro na simulação e a impossibilidade de se realizar a modelagem conforme o sistema real.

O erro observado, segundo o manual do software DesignBuilder, é causado devido ao fato de que a reta definida pelas condições de ar de admissão nominal da serpentina do sistema deve cruzar a curva de saturação do gráfico psicrométrico do modelo, sendo a interseção o ponto de operação do sistema simulado. Se a vazão de ar é muito baixa, a interseção pode não ocorrer e o cálculo do modelo não convergirá. Desta forma, para o template utilizado, não é possível considerar o valor de vazão do sistema real.

Sendo assim, optou-se por considerar uma vazão de ar de renovação suficientemente maior para o modelo convergir. Para o template utilizado no anfiteatro 2, a menor a vazão de ar de renovação possível a ser simulada foi de 1600 m<sup>3</sup>/h. Ou seja, um valor quase 18% maior que a vazão nominal do sistema real. Considerando que na caixa de ventilação presente nos anfiteatros a vazão de ar real é inferior à nominal, devido às perdas mecânicas nos dutos e a outros fatores, tem-se que a diferença entre o equipamento simulado e o equipamento real é ainda maior.

Este valor de 1600 m<sup>3</sup>/h foi utilizado para a validação da simulação termoenergética, já que é necessária uma modelagem mais fiel o possível da realidade. Como o parâmetro de interesse na simulação termoenergética é o consumo

de energia dos ambientes simulados, espera-se que esta medida acarrete em um valor de consumo ligeiramente maior do que a realidade, o que será confirmado na validação da modelagem, apresentada na próxima seção.

Salienta-se que para a simulação do consumo de energia anual, os valores de vazão de ar de renovação presentes na Tabela 2 serão utilizados. Estes valores estão de acordo com o estabelecido na norma NBR 16401-3, sendo que esta medida foi tomada pois os sistemas de renovação presentes nos anfiteatros, com exceção dos anfiteatros 4 e 12, apresentam vazão de ar insuficiente para garantir a Qualidade de Ar Interior nos ambientes em questão, o que acarreta em diversas consequências para os ocupantes.

Desta forma, para a simulação do consumo de energia anual, os sistemas de ar-condicionado dos anfiteatros 2, 3 e 7 foram modelados para atender os requisitos estabelecidos por norma, e não seus sistemas reais. Caso ocorra a necessária adequação destes sistemas, o seu maior consumo de energia já terá sido considerado.

Ressalta-se que o software possibilita a modelagem completa do sistema de ar condicionado, permitindo escolher o tipo e a potência do compressor, bem como o detalhamento das perdas e a modelagem de todos os outros componentes do sistema. Entretanto, optou-se por utilizar os detalhes de projeto do próprio template, considerando que inserir o valor do COP e da capacidade de cada aparelho é uma aproximação boa o suficiente para simular o consumo real de energia do sistema.

### **3.1.8 Validação do consumo de energia**

A validação do consumo de energia dos aparelhos de ar condicionado modelados se dará em duas etapas. Na primeira, será realizada a medição real do consumo de energia do sistema de ar condicionado de um dos anfiteatros durante 1 dia. Na segunda, com o modelo criado no software DesignBuilder, este dia será simulado e o consumo de energia do sistema real e do sistema simulado serão comparados, validando ou não a simulação termoenergética realizada.



### 3.1.8.1 *Medição do consumo de energia*

Para realizar a medição do consumo de energia do sistema de ar condicionado, foram utilizados 2 alicates wattímetros medidores de energia da marca Minipa, modelo ET-4050. Estes equipamentos são monofásicos e mostram o valor final da energia consumida ao final de um período, não registrando os valores aferidos no decorrer das medições.

Foi escolhido o anfiteatro 2 para realizar as medições, pois neste anfiteatro os aparelhos de ar condicionado são monofásicos, estão em boas condições e o quadro elétrico é acessível.

No quadro elétrico do anfiteatro, o sistema está dividido em 4 disjuntores monofásicos. Idealmente, quatro medidores deveriam ser utilizados, um para cada disjuntor. Como só estavam disponíveis dois medidores, um deles foi instalado junto ao disjuntor de uma das condensadoras do sistema e o outro instalado junto ao disjuntor de suas respectivas evaporadoras, medindo-se assim o consumo de metade dos aparelhos do sistema. Assumindo que o consumo de energia dos aparelhos é simétrico, estima-se que o valor do consumo de energia de todo o sistema de ar condicionado é o dobro do valor de energia medido.

A instalação dos medidores foi realizada com o aval da prefeitura do campus, que requisitou que técnicos da empresa terceirizada CWF realizassem a instalação e acompanhassem o procedimento.

As medições foram realizadas no dia 21 de junho de 2018, das 14 às 17 horas. O horário das medições foi limitado pela disponibilidade dos técnicos eletricitas da empresa terceirizada responsável. A temperatura do aparelho foi configurada para 23 °C, valor mínimo recomendado pela ANVISA.

Durante o período das medições, o valor medido pelos wattímetros foi contabilizado a cada 15 minutos. Assim, foi possível obter uma curva de potência média no decorrer do tempo das medições, além do valor final da energia consumida pelo ar condicionado. Além disso, o número de pessoas que ocupavam a sala neste período também foi levado em conta, podendo-se então, simular com maior fidelidade o comportamento do sistema de ar condicionado no software DesignBuilder.

### 3.1.8.2 *Simulação das medições*

Inicialmente, para simular as medições realizadas no anfiteatro 2, foram coletados os dados climáticos de Brasília no dia em que as medições foram realizadas. Estes dados climáticos foram obtidos através do site do INMET. Escolheu-se dados da estação meteorológica automática de Brasília, que fornece dados de temperatura, pressão, ponto de orvalho, umidade, velocidade e direção do vento, radiação e precipitação para cada hora do dia. Os dados climáticos para o dia da medição foram inseridos no arquivo climático que o software DesignBuilder utiliza nas simulações e são mostrados no Apêndice A deste trabalho.

Com os dados climáticos do dia das medições inseridos no software, utilizando a modelagem realizada do anfiteatro 2 e de seu sistema de ar-condicionado, definiu-se critérios de iluminação e ocupação para este ambiente de forma a se obter os parâmetros de entrada mais próximos dos observados durante as medições.

A iluminação do anfiteatro 2 conta com 18 luminárias de sobrepor com 2x32W de potência, 17 luminárias para 2 lâmpadas fluorescentes de 18W e uma luminária de embutir em forro para 4 lâmpadas de 16W. Além disso, o anfiteatro conta com 18 lâmpadas para a iluminação das escadas, de 18W, com luminária embutida na parede. Entretanto, estas luminárias embutidas nas paredes não estavam ligadas no dia das medições e não foram consideradas. Assim, a potência de iluminação para o anfiteatro 2 totalizou 1792W, com todas as lâmpadas consideradas como fluorescentes.

Para a ocupação, no dia das medições o número de pessoas presentes no anfiteatro foi contabilizado a cada 15 minutos. Infelizmente, o software DesignBuilder contabiliza apenas números múltiplos de 5 para a ocupação de pessoas, sendo necessário arredondar o número de ocupantes na simulação. Além disso, foi considerado que todos os ocupantes do ambiente estão sentados, com uma taxa metabólica de 130W por pessoa, segundo valores da norma NBR 16401-1.

Foi considerado que a porta do anfiteatro ficou 100% do tempo aberta, assim como ocorreu nas medições.

Por fim, assim como nas medições, o sistema de ar condicionado foi configurado para operar na temperatura de 23°C durante a simulação.

Foi simulado o período de 14 às 17 horas do dia 21 de junho de 2018, requisitando do software os dados do consumo de energia elétrica do aparelho de ar

condicionado do anfiteatro 2 a cada 15 minutos. Os dados obtidos foram plotados e comparados com os valores obtidos nas medições.

### **3.1.9 *Simulação do consumo anual de energia dos anfiteatros***

Após a validação, é possível simular o consumo de energia anual dos anfiteatros. Para isto, é necessário definir os períodos de ocupação dos anfiteatros, bem como quais e quando os equipamentos elétricos serão utilizados durante o ano.

Dado os requisitos mínimos em sistemas de ar-condicionado para se obter uma qualidade de ar interior aceitável para conforto, conforme especificado na norma ABNT 16401, supõe-se que os sistemas de ar-condicionado presentes nos anfiteatros do Instituto Central de Ciências devem operar enquanto estes ambientes estiverem em uso.

Desta forma, deve-se criar o cronograma de ocupação dos ambientes modelados. Para isto, foram analisadas as disciplinas com aula nos anfiteatros 2, 4 e 7 durante o segundo semestre de 2018. Nos anfiteatros 3 e 11, foi atribuído o mesmo cronograma de ocupação que o anfiteatro 7, já que os números de lugares disponíveis nestes ambientes são semelhantes.

Com o auxílio do website MatriculaWeb da Universidade de Brasília, foi possível verificar o número de alunos matriculados nas disciplinas ministradas em cada um dos anfiteatros para um dia de aula típico. Na Tabela 4 tem-se estruturado o cronograma de ocupação do anfiteatro 2 em um dia de aula normal, sendo a capacidade máxima deste anfiteatro o número de 105 pessoas. A partir disto, assume-se que todos os dias do período letivo seguem este padrão para o anfiteatro 2.

Tabela 4 - Ocupação do anfiteatro 2 no segundo semestre de 2018

<b>Horário</b>	<b>Disciplina</b>	<b>Nº de pessoas matriculadas</b>	<b>Percentual de Ocupação</b>
6:00	-	-	0%
7:00	-	-	0%
8:00	Física 2 - Turma E	80	76%
9:00	Física 2 - Turma E	80	76%
10:00	TransCAL - Turma A	80	76%
11:00	TransCAL - Turma A	80	76%
12:00	-	-	0%
13:00	-	-	0%
14:00	Variável complexa 1 - Turma A	65	62%
15:00	Variável complexa 1 - Turma A	65	62%
16:00	IAL - Turma A	66	63%
17:00	IAL - Turma A	66	63%
18:00	-	-	0%
19:00	Introdução a sociologia - Turma B	100	95%
20:00	Introdução a sociologia - Turma B	100	95%
21:00	Uni., Sociedade e Estado - Turma B	80	76%
22:00	Uni., Sociedade e Estado - Turma B	80	76%
23:00	Uni., Sociedade e Estado - Turma B	80	76%
0:00	-	0	0%

Este cronograma de ocupação foi atribuído para os dois semestres letivos do ano e também para o período de aulas de verão, que ocorrem em janeiro.

Os cronogramas de ocupação dos anfiteatros 4 e 7 se encontram no Apêndice B deste trabalho, sendo que as mesmas considerações que foram realizadas para o anfiteatro 2, também foram feitas para estes anfiteatros. O período de aulas considerado foi no mês de janeiro para o semestre de verão, de março a junho para o primeiro semestre letivo e de agosto a novembro para o segundo semestre.

Foi considerado que nos fins de semana de todo o ano os anfiteatros não são utilizados e permanecem desocupados, assim como nos meses de férias da universidade, que ocorrem em fevereiro, julho e dezembro.

Para a iluminação, foi considerado que as lâmpadas dos anfiteatros ficam ligadas de 7 às 23 horas durante os semestres letivos, de 7 às 18 horas no período de aulas de verão e desligadas durante o fim de semana e férias. A potência de iluminação para cada anfiteatro foi simulada como sendo a máxima potência instalada nestes ambientes.

Foi previsto ainda o uso de tomadas nos anfiteatros. Foi considerado que 5% dos alunos que ocupam o ambiente irão utilizar a tomada para recarregar o telefone celular ou o notebook. Desta forma, para cada aluno utilizando a tomada, foi atribuído a potência de 100W.

Referente aos sistemas de ar condicionado, foi considerado que estes equipamentos irão funcionar durante todos os períodos de aula. Ou seja, no semestre letivo entre 8 e 12 horas, 14 e 18 horas e entre 19 e 22:30 horas. No período de aulas de verão de 8 às 12 horas e de 14 às 18 horas.

Durante o intervalo entre as aulas, o sistema de ar-condicionado não será ligado, assim como durante as férias da universidade e durante os fins de semana.

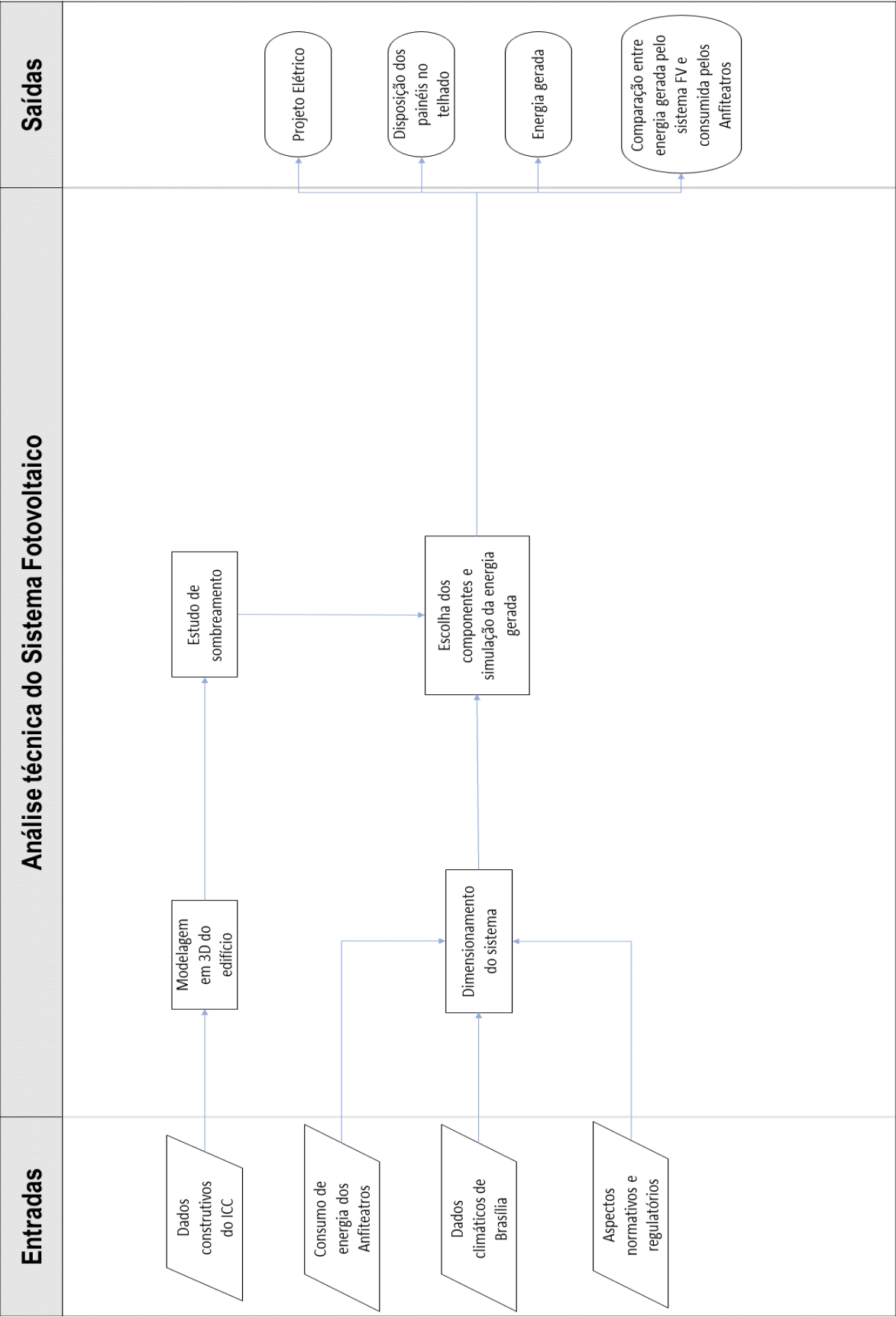
Com as considerações feitas, a simulação foi realizada, obtendo-se o consumo anual de energia de todos os anfiteatros do ICC.

Além disso, foi realizada a simulação diária do modelo a fim de se obter uma curva de carga simulada dos anfiteatros em um dia de aula típico. Os dias escolhidos para se realizar a análise foram os dias de 1 a 10 de março na simulação, coletando-se os dados a cada 30 minutos. Realizou-se a média dos valores por horário nos dias com aula, desprezando o final de semana, e assim formando uma curva de carga típica para cada um dos anfiteatros modelados. Desta forma, os dados obtidos foram plotados e as curvas de carga da simulação analisadas.

### **3.2 METODOLOGIA PARA A ANÁLISE TÉCNICA DO SISTEMA FOTOVOLTAICO**

Nesta seção será detalhada a metodologia utilizada para a elaboração da análise técnica do sistema fotovoltaico projetado para atender os anfiteatros do Instituto Central de Ciências da Universidade de Brasília. A metodologia adotada é apresentada no fluxograma presente na Figura 11.

Figura 11 - Fluxograma da metodologia adotada para a elaboração do projeto técnico do sistema fotovoltaico.



### **3.2.1 Levantamento de dados**

Para realizar o projeto do sistema fotovoltaico, é necessário que se obtenha informações sobre o consumo a ser suprido e do local a ser instalado. Como dito anteriormente, o sistema será projetado para suprir o consumo de energia dos anfiteatros do Instituto Central de Ciências, valor obtido através da simulação termoenergética realizada.

Referente ao local de instalação, deverá ser levantada a área disponível, a orientação do prédio, os dados climáticos da região e também a classificação tarifária do consumidor.

O Centro de planejamento Oscar Niemayer da Universidade de Brasília (CEPLAN – UnB) forneceu a planta baixa de todo o Instituto Central de Ciências, obtendo-se assim parte dos dados construtivos necessários nesta etapa do trabalho. Além disso, para se obter a orientação do prédio em questão, o software Google Earth foi utilizado.

Deve-se levantar os dados climáticos da região do projeto, que no caso deste trabalho é Brasília. Estes dados são de vital importância para os resultados, já que a energia gerada pelo sistema fotovoltaico depende diretamente da irradiação do local, bem como das temperaturas ambientes e outros fatores climáticos.

Como na simulação termoenergética dados climáticos foram utilizados, por uma questão de uniformidade na análise, no projeto fotovoltaico o mesmo conjunto de dados foi considerado. Desta forma, na simulação do sistema fotovoltaico, foram utilizados os arquivos climáticos “INMET 2016”, disponibilizados no website do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina.

Sobre a classificação tarifária do consumidor, a potência nominal do sistema instalado é limitada pela demanda contratada perante a distribuidora. Além disso, o valor da tarifa de energia é de vital importância para a análise econômica do projeto fotovoltaico. Para a obtenção destes dados, a Prefeitura da Universidade de Brasília foi consultada e forneceu todos os dados requisitados.

### **3.2.2 Modelagem em 3D do prédio**

Para realizar a modelagem tridimensional da envoltória do Instituto Central de Ciências, os dados fornecidos pelo CEPLAN – UnB foram utilizados.

Foram fornecidas as plantas baixas do subsolo, do térreo e do mezanino do prédio. Com os valores das dimensões do ICC apresentadas nas plantas baixas, foi criado um modelo tridimensional do prédio no software SketchUp, sendo este modelo então utilizado no estudo de sombreamento das áreas de interesse.

Ressalta-se que o telhado do referido prédio é plano, não possuindo nenhuma inclinação. Esta condição é excelente para a instalação fotovoltaica, já que a inclinação das placas e a sua direção em relação ao norte podem ser otimizados.

### **3.2.3 Estudo de sombreamento**

Inicialmente, para realizar o estudo de sombreamento, observações dos arredores do prédio foram feitas pessoalmente a fim de se buscar fatores que poderiam causar sombra nas áreas de interesse. A maior causa de preocupação são as árvores mais próximas ao prédio.

Além disso, foi utilizado o software Google Earth, para verificar a presença de objetos no telhado do Instituto Central de Ciências que impeçam a instalação das placas fotovoltaicas.

Para realizar o estudo de sombreamento, utilizou-se a ferramenta “Shadows” do próprio software SketchUp. Inserindo a coordenada geográfica do local e o norte geográfico do modelo, pode-se observar a simulação do sombreamento no prédio em qualquer dia do ano a em qualquer hora.

Destaca-se que este estudo é vital para a escolha da disposição mais adequada para os painéis fotovoltaicos.

### **3.2.4 Dimensionamento do sistema**

A partir do valor do consumo de energia dos anfiteatros obtido na simulação termoenergética, deve-se obter um indicativo da potência desejada para o sistema. Nesta etapa o software PVsyst foi utilizado, realizando-se um projeto preliminar do sistema.



No projeto preliminar o software fornece uma previsão da potência nominal do sistema fotovoltaico necessária para atender a energia anual desejada, bem como a área necessária para a instalação de todas as placas do sistema.

Deve-se definir ainda a configuração desejada para o sistema do ponto de vista do número de inversores. As três principais configurações para um sistema fotovoltaico são:

- Um único inversor para todo o sistema (Inversor central);
- Um inversor para cada *string*;
- Múltiplos inversores para o sistema.

No primeiro caso, tem-se a vantagem de uma redução no investimento inicial e nos custos de manutenção, sendo a sua desvantagem o fato de que a falha deste equipamento acarreta a interrupção da produção de energia de todo o sistema. No segundo caso, cada *string* de placas é conectada diretamente no seu próprio inversor, operando em seu próprio ponto de máxima potência. A desvantagem é o alto investimento necessário bem como o alto custo de manutenção.

No terceiro caso, o projeto é dividido em subsistemas compostos por um número definido de *strings* conectadas em paralelo com um inversor. O número de inversores é menor que no caso anterior, mantendo as vantagens de operar no ponto de máxima potência e com os inversores fornecendo diretamente o diagnóstico sobre a produção de energia de cada subsistema.

Assim sendo, a partir da configuração desejada, divide-se a potência nominal obtida no projeto preliminar pelo número de inversores que se deseja, resultando em uma estimativa de potência nominal para cada inversor do projeto.

### **3.2.5 Escolha dos componentes e simulação da energia gerada**

Com o valor da potência nominal, realiza-se o projeto técnico de fato. Primeiramente, insere-se os dados climáticos que serão utilizados na simulação final do sistema. Em seguida, define-se a inclinação desejada dos painéis e seu azimute, além de definir se os módulos estão fixos, se possuem mais de uma inclinação por ano ou se possuem seguidores solar. Com a ferramenta “Presizing Help”, insere-se a potência nominal desejada.

Em seguida, a marca e o modelo das placas e inversores são escolhidas, definindo-se também a quantidade de módulos em série e em paralelo conectados aos inversores necessária para atingir a potência desejada. Detalham-se as perdas do sistema e inicia-se a simulação.

A simulação retorna um relatório com os parâmetros mais relevantes para o projeto, entre eles, a geração diária, mensal e anual de energia. Este relatório está em anexo para análise do leitor.

Com os resultados obtidos nesta seção, é possível realizar o projeto elétrico do sistema fotovoltaico e a disposição das placas no telhado do prédio.

A inserção dos parâmetros de dimensionamento no PVSyst é melhor detalhada mais adiante.

### **3.2.6 Disposição das placas fotovoltaicas no telhado**

A partir da quantidade de placas fotovoltaicas e de inversores, da inclinação dos módulos, das suas dimensões e da orientação azimutal definida, é realizada uma proposta para a disposição das placas fotovoltaicas no telhado do Instituto Central de Ciências. Salienta-se que esta proposta respeita as conclusões obtidas no estudo de sombreamento realizado.

Utilizando o software SketchUp, a disposição das placas fotovoltaicas do sistema projetado é inserida no modelo tridimensional anteriormente construído.

### **3.2.7 Projeto elétrico**

Com a marca e modelo dos painéis e inversores do sistema fotovoltaico escolhidos, além da quantidade de *strings* e módulos em paralelo, tem-se a corrente de curto circuito e tensão de circuito aberto para cada *string*, além da potência nominal do sistema. Em posse destas informações, pode-se dimensionar os condutores e os componentes de proteção do sistema.

A norma brasileira NBR 5410 estipula alguns métodos para se definir a seção reta do condutor, entre eles: a capacidade de corrente e a queda de tensão. Deve-se aplicar o condutor com maior seção, desde que este seja superior a 2,5mm<sup>2</sup>.

Pelo método da capacidade de corrente, a corrente nominal do circuito deve ser considerada e corrigida por determinados fatores (temperatura, agrupamento de

condutores, agrupamento de circuitos e etc.), sendo então procurado um condutor que seja capaz de suportar esta corrente.

O segundo método assume a ocorrência de uma queda de tensão consequente da passagem de corrente por todos os elementos do circuito. A NBR 5410 estabelece limites para essa queda de tensão que devem ser obedecidos e a seção nominal adotada deve, portanto, respeitar esse limite. Em sistemas em corrente contínua, a queda de tensão normalmente possui um limite entre 1% e 3% (CRESESB, 2014). Para realizar o cálculo da seção nominal do condutor, pode-se utilizar a equação a seguir.

$$S(mm^2) = \rho \cdot \frac{D \cdot I}{\Delta V} \quad (2)$$

onde:

$S (mm^2)$ : seção transversal do cabo

$\rho (\Omega \cdot mm^2/m)$ : resistividade do material condutor

$D (m)$ : distância que o condutor percorre

$I (A)$ : corrente nominal

$\Delta V$ : queda de tensão permitida, em percentual da tensão nominal.

Ressalta-se que, para o lado em corrente contínua do sistema, os condutores a serem utilizados são cabos que se adequem à norma NBR 16612, que especifica os requisitos mínimos para a qualificação e aceitação de cabos em instalações de energia fotovoltaica, devendo eles serem resistentes a altas temperaturas e à influência dos raios UV. Este tipo de condutor, possui capacidades de condução diferentes dos cabos tradicionais, já que possuem camadas extras de isolamento e, consequentemente, respondem de forma diferente a variações na temperatura. Desta forma, para o circuito em corrente contínua, as especificações desse tipo de condutor deverão ser utilizadas para o dimensionamento.

Com as seções nominais dos condutores definidas, a proteção do sistema deverá ser dimensionada. Nesta etapa serão dimensionados disjuntores, dispositivos de proteção contra surtos, chaves seccionadoras e fusíveis. As especificações devem

se basear nas normas vigentes, observando-se os valores especificados no projeto do sistema fotovoltaico.

Por fim, utilizando o software AutoCAD, os diagramas elétricos para o projeto foram elaborados.

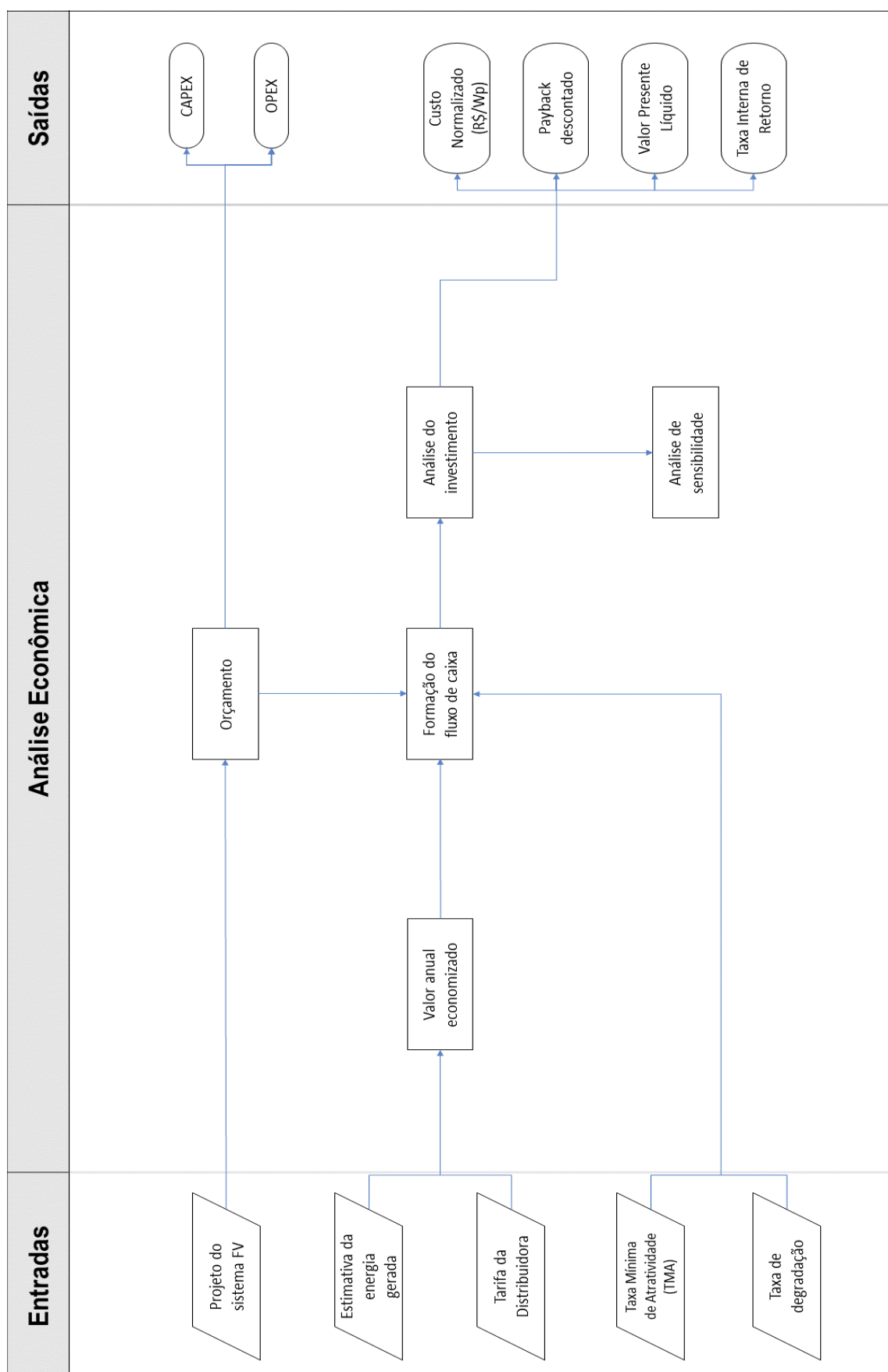
### ***3.2.8 Comparação entre a energia gerada pelo sistema fotovoltaico e a consumida pelos anfiteatros***

Em posse dos valores diários, mensais e anuais de energia elétrica consumida pelos anfiteatros, obtidos através do software DesignBuilder com a metodologia explicada na seção 3.1.9, e dos valores de produção mensal e anual de energia pelo sistema fotovoltaico, obtidos pelo software PVsyst com a metodologia apresentada nas seções anteriores, é possível realizar a comparação entre os dois resultados.

## **3.3 METODOLOGIA PARA A ANÁLISE ECONÔMICA**

Nesta seção será detalhada a metodologia utilizada para a elaboração da análise econômica do sistema fotovoltaico projetado para atender os anfiteatros do Instituto Central de Ciências da Universidade de Brasília. A metodologia adotada é apresentada no fluxograma presente na Figura 12.

Figura 12 - Fluxograma da metodologia utilizada para a análise econômica.

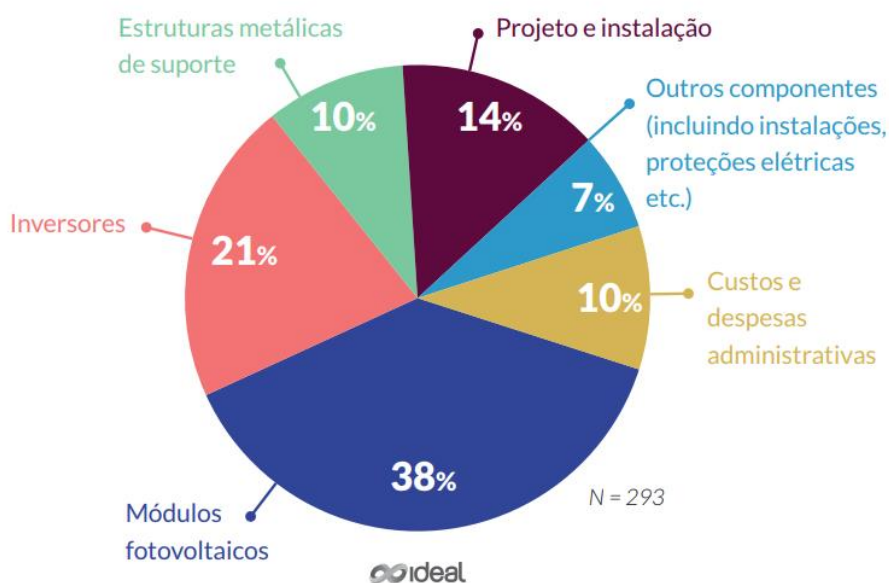


### 3.3.1 Orçamento

A primeira etapa da análise econômica é a realização do orçamento, onde serão obtidos os custos do investimento inicial do sistema (Capex) e o custo de operação e manutenção (Opex). Para isso, deve-se levar em conta todos os custos relativos ao projeto, seus componentes, sua instalação, os custos de operação e manutenção, além dos custos de troca dos equipamentos em questão.

Segundo o Instituto Ideal (2018), o custo de investimento (Capex) leva em conta diversos fatores, como custo de inversores, painéis fotovoltaicos, estrutura metálica e projeto. Em média, estes custos ocupam as porcentagens descritas na Figura 13. Ressalta-se que o Instituto realiza a pesquisa de preço todos os anos, sendo que a composição se mantém estável em todos os anos da pesquisa, ou seja, não existe nenhuma oscilação em relação aos custos relativos dos componentes.

Figura 13 - Custo total da instalação de um sistema fotovoltaico.



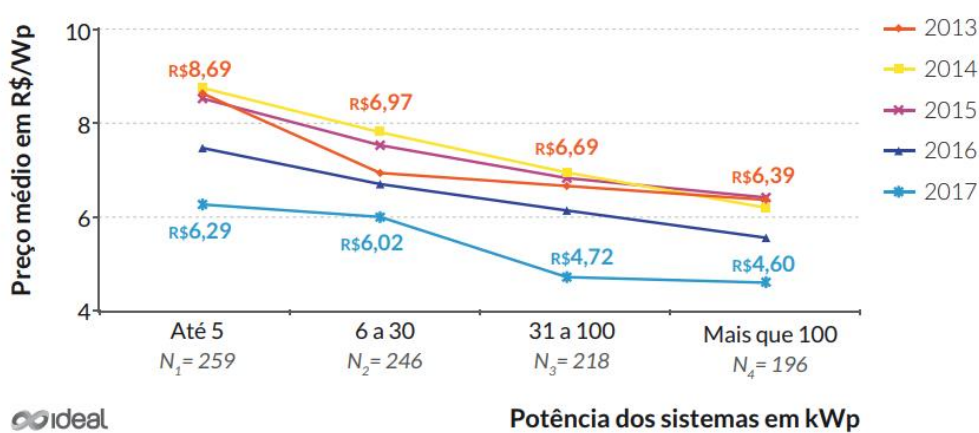
Fonte: (INSTITUTO IDEAL, 2018)

Devido à dificuldade de se obter um preço para todos os componentes do projeto, como a estrutura, conectores, proteção e etc., além do preço dos serviços de instalação, optou-se em realizar a normalização dos custos baseado na composição obtida pelo Instituto Ideal. Desta forma, será realizada uma pesquisa de mercado para ser encontrado o preço dos painéis fotovoltaicos e do inversor. O preço final destes

dois componentes deve representar aproximadamente 59% do custo total de instalação.

Para verificar a razoabilidade dos valores encontrados, compara-se o montante encontrado com o preço médio de sistemas fotovoltaicos em 2017, obtidos também pelo Instituto Ideal (2018) e mostrado na Figura 14.

Figura 14 - Preço médio de sistemas fotovoltaicos em 2017 para diferentes potências.



Fonte: (INSTITUTO IDEAL, 2018)

Para completar o orçamento, é necessário estimar o valor a ser gasto com a operação e manutenção do sistema (Opex). Devido à grande complexidade apontada por BARBOSA (2015), é necessário realizar uma estimativa para esse parâmetro. Estudos sobre viabilidade econômica como o da ABINEE (2012) e da EPE (2012) utilizam como valor para o Opex 1% a.a. do valor do Capex. Sendo assim, este percentual será utilizado neste estudo.

### 3.3.2 Valor anual economizado

A fonte de receita de um sistema fotovoltaico é analisada levando-se em conta dois casos distintos. O primeiro caso é quando a energia injetada na rede pela geração fotovoltaica é maior do que o consumo da unidade consumidora, sendo que neste caso a fonte de receita é um crédito de energia gerado pelo sistema fotovoltaico sob a resolução 482/2012 da ANEEL, que permite o uso desses créditos para a compensação energética do consumo. O segundo caso é quando não há energia

injetada na rede, ou seja, a demanda elétrica da unidade consumidora é maior que a geração fotovoltaica.

Como o projeto será instalado na Universidade de Brasília, que possui valores de demanda significativamente superior à potência instalada do sistema fotovoltaico, é de se esperar que a geração fotovoltaica nunca supere o consumo da unidade consumidora. Desta forma, não se terá a formação de créditos de energia.

Com isso, pode-se calcular o valor economizado como sendo a energia gerada pelo sistema fotovoltaico multiplicada pela tarifa cobrada pela concessionária, já que a energia fornecida pelo sistema não será disponibilizada pela rede elétrica, sendo então este o valor de consumo economizado.

### **3.3.3 Formação do fluxo de caixa**

Para se ter uma melhor compreensão da viabilidade financeira do projeto, o fluxo de caixa deve ser analisado. Além das receitas obtidas na seção anterior, para a formação do fluxo de caixa é necessário também definir as fontes de despesas ao longo da vida útil do projeto. Estima-se que em média uma instalação fotovoltaica tenha como vida útil por volta de 25 anos, sendo esta a garantia de diversos fabricantes de módulos de silício.

As fontes de despesas que devem ser consideradas em um sistema fotovoltaico são os custos de operação e manutenção (Opex) e o valor do investimento inicial (Capex), obtidos conforme a metodologia da seção 3.3.1. Além disso, estima-se que a vida útil dos inversores seja, em média, entre 10 e 15 anos. Desta forma, a troca dos inversores devem ser incluídos no fluxo de caixa.

Deve ser considerado ainda a taxa de degradação dos painéis fotovoltaicos para a correta análise do projeto. Sabe-se que toda instalação envelhece com o passar do tempo, impactando diretamente na geração final. BRANKER (2011) considera que a degradação do painel fotovoltaico corresponda a 0,5% a 1% do total de geração de energia anual, sendo este valor acumulativo. Desta forma, na análise econômica este fator deve ser levado em conta.

No trabalho realizado por ABINEE (2012), utilizou-se uma degradação anual do módulo de 0,75% e um tempo de vida útil de 25 anos para sistemas fotovoltaicos convencionais. BARBOSA (2015), seguiu a mesma linha de pensamento. Desta



forma, conclui-se faixa de valores anteriormente mostrada por BRANKER (2011) é usualmente utilizada em outros estudos.

Com estas considerações, elabora-se o fluxo de caixa do projeto, do ano de instalação do sistema até o ano 25, com todas as receitas e débitos ao longo dos anos.

### **3.3.4 *Análise do investimento***

Com o fluxo de caixa formado, pode-se agora analisar a viabilidade econômica do projeto. Para isto, é necessário definir indicadores econômicos que podem ser utilizados para se obter critérios de decisão acerca da viabilidade do projeto. Optou-se por adotar cinco indicadores econômicos. São eles:

- *Payback* descontado;
- Valor presente líquido (VPL);
- Taxa interna de retorno (TIR);
- Retorno sobre o investimento (ROI);
- Custo anual equivalente (CAE);

Além disso, é necessário definir uma Taxa mínima de atratividade (TMA) para o projeto, definida como a expectativa mínima da lucratividade em termos de taxas de juros, que se espera em determinado investimento. Para que um investimento seja considerado lucrativo, o investidor deve receber mais dinheiro do que o capital que foi investido. Ou seja, uma taxa de retorno de investimento justa deve ser realizável.

A TMA deve ser mais alta do que a taxa esperada de um banco ou de determinado investimento seguro, que envolva um risco mínimo de investimento. Assim sendo, a nova proposta deve render, no mínimo, a taxa de juros equivalente às aplicações correntes e de pouco risco (RODRIGUES, 2015).

Neste trabalho, a taxa mínima de atratividade (TMA) será calculada a partir do valor da Taxa de longo prazo (TLP), do BNDES. Esta taxa é a mais indicada para o investimento aqui tratado, pois retrata o custo básico dos financiamentos para investimento de infraestrutura do BNDES.

A TLP substituiu a antiga taxa de juros de longo prazo (TJLP). Ressalta-se que embora a antiga TJLP fosse nominalmente fixa, a variação da inflação tornava a taxa real volátil conforme o tempo. Com a TLP, a taxa de juro real é fixa em todo período de análise, causando menos instabilidade no custo dos financiamentos do que a TJLP. Além disso, a nova taxa compõe a taxa de juros final em conjunto com as remunerações do BNDES e dos bancos repassadores, além da taxa de risco de crédito do cliente (BNDES, 2018).

#### 3.3.4.1 *Payback descontado*

Este indicador consiste na avaliação do momento temporal no qual a receita acumulada é igual ao investimento total do projeto. Este método deve levar em conta a temporalidade do dinheiro.

O *payback* não se trata de um critério de rentabilidade e sim de um indicador de risco do projeto. Ele deve ser usado fundamentalmente como índice de risco e não como comparador de projetos, principalmente se está comparando alternativas com tempos de vida diferentes. Projetos com maiores *payback* envolvem riscos maiores, sendo então sempre desejável que ele seja o menor possível.

#### 3.3.4.2 *Valor presente líquido (VPL)*

O valor presente líquido é a soma dos desembolsos e receitas de um investimento, referido ao instante inicial (CAMARGO, 1998). Na prática, pode ser determinado da seguinte forma:

$$VPL(i) = \sum_{t=0}^n \frac{(R_k - D_k)}{(1+i)^k} \quad (3)$$

Onde:

$R_k$ : Receita no período K;

$D_k$ : Despesa no período K;

k: período;

i: Taxa mínima de atratividade (TMA);

n: vida útil do projeto.

Desta forma, aplica-se ao fluxo de caixa a soma de receitas e despesas, considerando o valor presente do resultado. O valor anualizado é somado e assim se encontra o VPL. No caso tratado neste trabalho, caso o VPL apresente um sinal positivo no final do ano 25, tem-se um investimento viável. Quando se comparara o valor encontrado com outros investimentos, quanto maior o VPL no mesmo período, mais vantajoso economicamente ele é.

Entretanto, ressalta-se que o VPL não deve ser utilizado isoladamente quando se pretende comparar alternativas de investimento, já que estas podem apresentar o mesmo VPL, mas possuírem diferentes custos de investimento e duração.

#### 3.3.4.3 *Retorno sobre o investimento (ROI)*

O ROI é intrinsicamente ligado ao VPL, já que é calculado a partir dele. Este indicador é muito utilizado para ajudar na decisão de investimentos em novos negócios e projetos, indicando o potencial de retorno sobre o investimento realizado. A métrica do ROI mostra, por meio de uma taxa de retorno, quanto um investidor ganhou (ou perdeu) em relação ao valor aplicado em um determinado investimento, dando ao mesmo tempo uma análise sobre o que aconteceu e uma perspectiva sobre o futuro do mesmo. Em resumo, o ROI representa o lucro ou prejuízo obtido depois de um determinado investimento (BONA, 2016).

O retorno sobre o investimento pode ser calculado por:

$$ROI = \frac{VPL}{Investimento\ Inicial} \quad (4)$$

Em que

VPL: Valor presente líquido.

#### 3.3.4.4 *Taxa interna de Retorno (TIR)*

A taxa interna de retorno, segundo CAMARGO (1998) é a taxa de juros que torna nulo o valor presente líquido (VPL) de um determinado investimento, ou seja, ao final do período n-ésimo, não há lucro, nem prejuízo. Simplificadamente, a TIR pode ser definida como um percentual de rentabilidade do projeto que está sendo analisado.

Neste trabalho, caso a TIR seja maior que a Taxa mínima de atratividade (TMA), o projeto é considerado viável. Caso contrário, é considerado inviável.

Não existe uma fórmula explícita para esse parâmetro econômico, sendo obtido apenas de modo iterativo. Neste trabalho, o software Excel foi utilizado para o cálculo da TIR.

#### 3.3.4.5 *Custo anual equivalente (CAE)*

O método do custo anual equivalente consiste em transformar uma sequência de desembolsos em uma série uniforme. Uma das vantagens desse método é o de poder se comparar alternativas de investimento com duração diferentes (CAMARGO,1998).

Para se realizar o cálculo deste indicador, deve-se referenciar todas as despesas do projeto ao longo de sua vida útil para o valor presente, obtendo-se um “VPL” para todas as despesas. Em seguida, este valor é transformado em uma série uniforme pela equação:

$$CAE = VPLd \left( \frac{i}{(1+i)^n - 1} + i \right) \quad (5)$$

onde

VPLd: Valor presente de todas as despesas do projeto em sua vida útil;

i: Taxa mínima de atratividade (TMA);

n: vida útil do projeto.

Neste trabalho, este indicador será utilizado para se obter o custo da energia gerada, em R\$ por kWh. Para isto, basta dividir o valor da energia gerada anualmente pelo sistema fotovoltaico pelo Custo anual equivalente (CAE).

### **3.3.5 Análise de sensibilidade**

A análise de sensibilidade consiste na simulação de cenários de incerteza a fim de ser verificar como a variação dos parâmetros afeta os indicadores de viabilidade econômica do projeto, destacando-se os pontos em que eles tornarão o projeto viável ou inviável. Com o auxílio de gráficos, comparam-se os mais diversos cenários e as influências dos parâmetros iniciais, determinando os limites de variação máximo para cada parâmetro.

Os parâmetros variados foram o valor do investimento inicial, em R\$/Wp, a Taxa mínima de atratividade (TMA), a taxa de degradação de painéis e o reajuste tarifa elétrica em relação à inflação.

Para a realização desta análise, foi utilizada a ferramenta “Tabela de dados” do software Excel.

## **3.4 MATERIAIS UTILIZADOS**

Neste item, serão detalhados os materiais utilizados para a realização deste trabalho.

Os softwares DesignBuilder e PVSyst, utilizados para a simulação termoenergética e para o projeto fotovoltaico, respectivamente, serão melhor detalhados dado a relevância dos programas para o trabalho.

### **3.4.1 Medidor de energia**

Para realizar a medição do consumo de energia do sistema de ar condicionado, foram utilizados 2 alicates wattímetros medidores de energia da marca Minipa, modelo ET-4050. Estes equipamentos são monofásicos e mostram o valor final da energia consumida ao final de um período, não registrando os valores aferidos no decorrer das medições.

Figura 15 - Wattímetro medidor de energia Minipa ET-4050.



Fonte: Walmart. Disponível em: <<https://www.walmart.com.br/alicata-wattimetro-minipa-et-4050-trifasico-true-rms-medidor-de-potencia-e-energia/3106493/pr>>. Acesso em: 24 de outubro de 2018

### 3.4.2 Ferramentas computacionais

#### 3.4.2.1 DesignBuilder

Para a realização da simulação termoenergética, o software DesignBuilder foi utilizado. Este programa computacional é uma interface gráfica avançada para o software *EnergyPlus*, que é o responsável pelo processamento e realização dos cálculos.

O EnergyPlus é um *software* de simulação de energia em edifícios que permite desenvolver estudos em ambientes reais ou em fase de projeto. Com a utilização do EnergyPlus pretende-se que este programa gere um modelo baseado na envoltória do edifício, nas suas funcionalidades internas, nas taxas de utilização dos sistemas de ar-condicionado e nos dados climáticos da região geográfica do prédio. Com este modelo, realizam-se simulações horárias de modo a estimar a temperatura interior dos ambientes bem como os consumos de energia dos equipamentos elétricos presentes no prédio, como os sistemas de climatização e de iluminação. Além das simulações horárias, o software é capaz de realizar simulações em intervalos de tempo inferiores à hora, permitindo ao usuário obter resultados do comportamento térmico do edifício ao longo do dia e dos meses (ENERGYPLUS, 2015).

Entretanto, o EnergyPlus apresenta uma interface bastante complexa, o que dificulta a inserção de dados no programa. Contudo, este programa permite o desenvolvimento independente de outras ferramentas, o que resulta na adoção do software DesignBuilder como uma interface gráfica de maior facilidade de utilização.

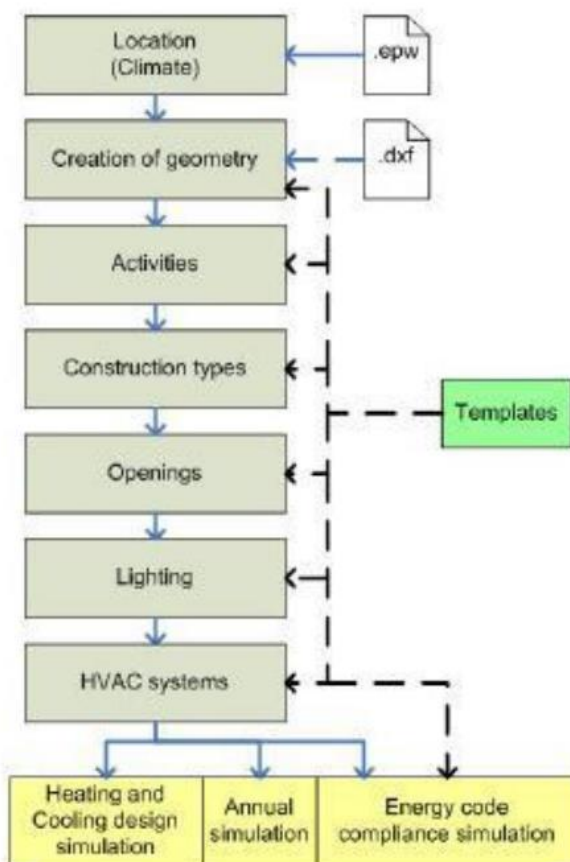
O DesignBuilder é um software especificamente desenvolvido em torno do programa EnergyPlus, que permite definir modelos construtivos de uma forma muito mais simples, mas utilizando o EnergyPlus como motor de simulação. Este programa permite a modelagem do edifício, inserindo as suas características construtivas e as características de seus sistemas energéticos a fim de se realizar simulações para a determinação dos consumos energéticos e das potências de climatização, bem como testar estratégias de otimização energética (DESIGNBUILDER, 2016)

Com a utilização do DesignBuilder, é possível:

- Gerar simulações para o modelo utilizando informação climática horária para verificar como o edifício irá se comportar durante a operação;
- Cálculo do consumo de energia do edifício;
- Cálculo de carga térmica para aquecimento e arrefecimento;
- Simulação térmica de edifícios naturalmente ventilados;
- Relatório de economia de energia elétrica no sistema de iluminação devido ao uso de luz natural;
- Projeto detalhado de sistema AVAC;
- Relatório de certificação LEED.

O fluxo de trabalho do DesignBuilder, mostrado na Figura 16, começa com a seleção de um local e o clima correspondente através de um arquivo com dados climáticos no formato .epw, seguido pela criação da geometria do modelo de construção. A escolha da localização está associada com a escolha dos dados climáticos, já que o clima do local influencia consideravelmente as necessidades de climatização. A geometria é necessária para a simulação de desempenho térmico do edifício.

Figura 16 - Fluxo de trabalho do software DesignBuilder.



Fonte: (BARBOSA, 2017)

A introdução de dados do edifício é feita através de cinco categorias:

- **Activity:** Os dados referentes nessa categoria são relacionados no tipo de ocupação de cada ambiente, nos ganhos térmicos internos e no controle de temperatura, umidade e ventilação. Referente à ocupação, deve-se definir a densidade de pessoas em cada ambiente e as variações no número de ocupantes ao longo dos dias e meses. Atribui-se a taxa metabólica para cada pessoa, que é a quantidade de calor proveniente do metabolismo dos ocupantes. Define-se ainda a taxa de geração de CO<sub>2</sub> por pessoa e um fator de correção para os ocupantes, já que se considera que homens, mulheres e crianças possuem taxas metabólicas distintas.

Referente ao controle do ambiente, é possível definir as temperaturas desejadas que o sistema de ar condicionado deve alcançar, tanto no

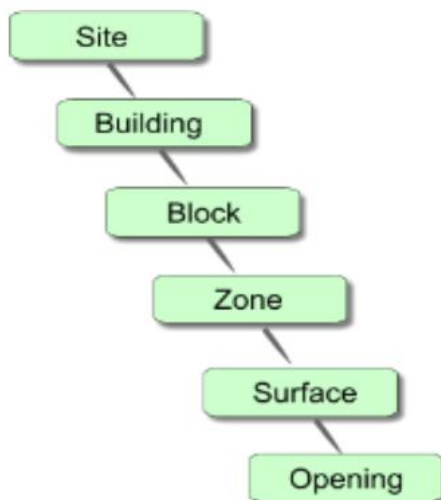


aquecimento como no arrefecimento, o controle de umidade, os níveis de entrada de ar e até mesmo a iluminância desejada para o sistema de iluminação. Define-se ainda os ganhos térmicos causados por computadores, equipamentos de escritórios, entre outros.

- **Construction:** São os dados referentes ao tipo de construção e materiais constituintes da envoltória do prédio modelado.
- **Openings:** Nesta categoria são definidas as características das janelas e portas, além de definir quando elas ficam abertas ou fechadas.
- **Lighting:** Aqui define-se a potência de iluminação presente em cada ambiente e o tipo das lâmpadas. Pode-se definir ainda o tipo de instalação, a fração radiante e a fração visível para a iluminação, que são fatores que variam a partir do tipo de tecnologia utilizado.
- **HVAC:** Nesta categoria são definidas as características dos sistemas de ar-condicionado e ventilação. Aqui são definidos o tipo do sistema HVAC utilizado e sua capacidade nominal, seu COP, sua vazão e outras características construtivas. Além disso, define-se a forma de se calcular a distribuição de temperatura do ar, que reflete nos resultados obtidos pela simulação.

O usuário pode escolher suas próprias predefinições de acordo com as características de cada edifício. Todas estas ferramentas aliadas com a estrutura hierarquizada presente na Figura 17, permitem que se defina e altere rapidamente as características do prédio no nível mais geral até o mais detalhado das partes constituintes das zonas térmicas. A seguir é explicada a hierarquia de dados no software DesignBuilder.

Figura 17 - Hierarquia de dados no software DesignBuilder.



Fonte: (DESIGNBUILDER, 2016)

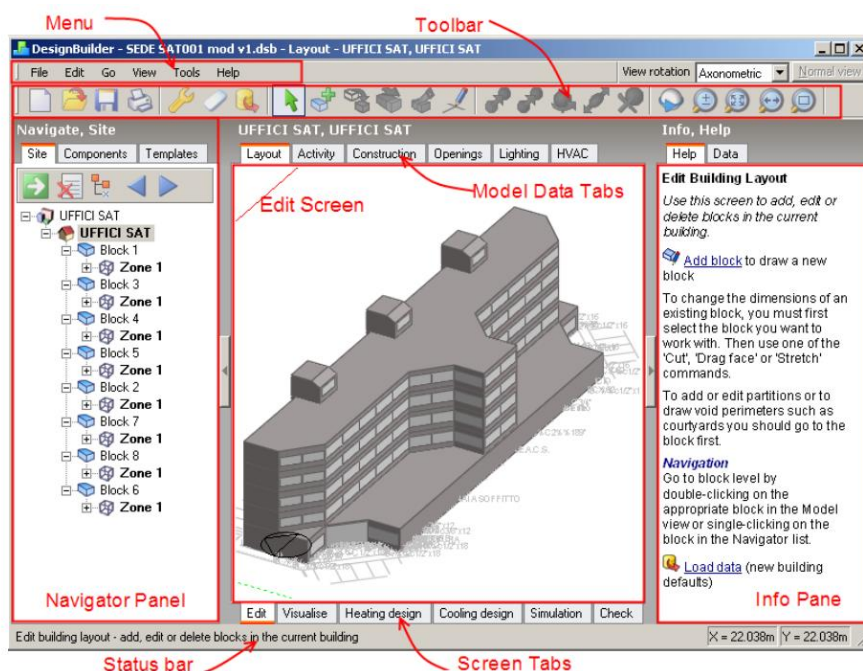
- Site: É a localização geográfica do prédio a ser modelado.
- Building: Consiste na construção representada pelo modelo.
- Block: Os blocos são as formas geométricas básicas do DesignBuilder e são delimitadas pelas paredes externas de uma construção.
- Zone: As zonas são criadas a partir da divisão dos blocos e caracterizam ambientes com diferentes características de uso e climatização. São denominadas de zonas térmicas.
- Surfaces: São as superfícies que formam as zonas.
- Opening: São as aberturas como paredes e janelas. São os últimos elementos modelados e podem ser criados individualmente em cada superfície.

Como o software segue uma hierarquia de dados, ao efetuar uma alteração numa determinada categoria, essa alteração é aplicada a todos os níveis subjacentes, o que facilita na sua manipulação e agiliza a parametrização do modelo.

Com o modelo pronto, pode-se facilmente configurar os parâmetros para a simulação da carga térmica dos ambientes de interesse bem como a simulação diária, mensal e anual do comportamento termoenergético do prédio.

Na Figura 18 abaixo é mostrado a interface principal do software DesignBuilder.

Figura 18 - Tela do software DesignBuilder.



Fonte: (DESIGNBUILDER, 2016)

### 3.4.2.2 PVSyst

O programa PVSyst – Photovoltaic Systems foi escolhido para dimensionar o sistema fotovoltaico e simular a geração anual de energia obtida. Essa ferramenta surgiu na Universidade de Genebra, na Suíça em 1992 e é, atualmente, comercializado pela empresa PVSyst SA.

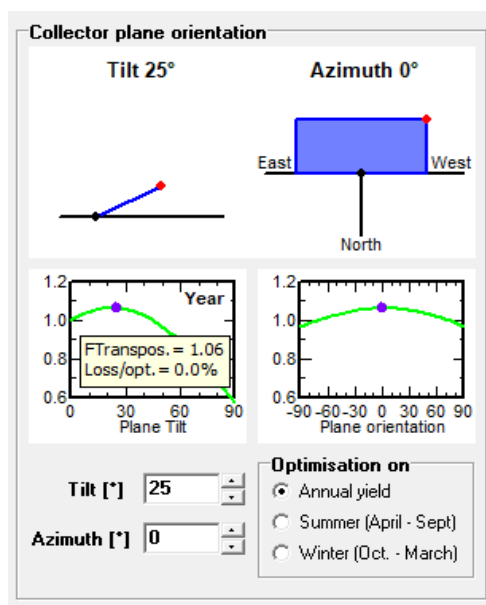
Além de permitir o dimensionamento e simulação dos dados de sistemas fotovoltaicos, o programa conta com uma base de dados meteorológicos própria, mas permite também a importação de outros arquivos climáticos. Além disso, o software apresenta uma rica base de dados com informações sobre placas fotovoltaicas e inversores dos maiores fabricantes do mundo.

Para aplicar os recursos do PVSyst de modo correto no estudo de sistemas fotovoltaicos é preciso inserir os dados do projeto nas entradas correspondentes do programa.

Inicialmente, é possível realizar um pré-projeto e se obter um indicativo da potência desejada para o sistema. Para se obter uma estimativa da potência do sistema, o software fornece três métodos para o dimensionamento: pode-se especificar a área disponível para o projeto, a energia anual desejada ou a própria

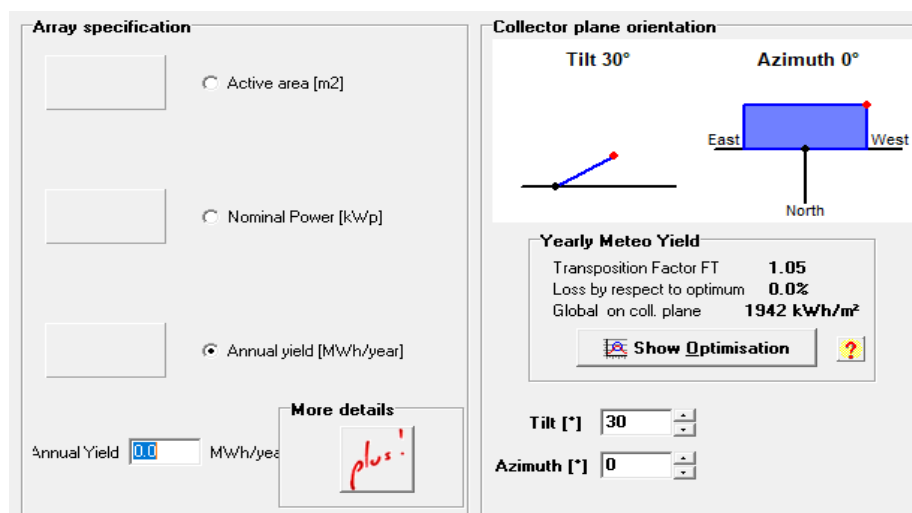
potência do sistema. Em seguida, deve-se inserir a inclinação dos painéis fotovoltaicos bem como o seu ângulo azimutal. O software PVsyst, a partir dos dados climáticos, fornece a otimização desses dois últimos parâmetros, podendo-se escolher se a otimização ocorre em função da produção anual do sistema ou do período de verão ou do inverno. A otimização realizada pelo software e a etapa de dimensionamento podem ser vistas abaixo.

Figura 19 - Otimização da inclinação e do azimute dos painéis fotovoltaicos em função da produção anual de energia.



Fonte: Captura de tela do Software PVsyst. Autoria própria.

Figura 20 - Etapa de dimensionamento do sistema no software PVsyst.



Fonte: Captura de tela do Software PVsyst. Autoria própria.

Por fim, define-se as características dos painéis e sua forma de instalação. Deve-se definir o tipo e a tecnologia utilizada do painel fotovoltaico que se pretende utilizar, a configuração da instalação no telhado e se o sistema será ventilado ou não. O software retorna uma estimativa de potência necessária para suprir a especificação desejada.

Para a realização do projeto de fato, insere-se a potência nominal desejada para o sistema no parâmetro *Presizing Help* do software. A marca e o modelo das placas e dos inversores são escolhidas, definindo-se também a quantidade de módulos em série e em paralelo conectados ao inversor.

Figura 21 - Escolha dos módulos e inversor no software PVsyst

**Global System configuration**

1 Number of kinds of sub-arrays

**Global system summary**

Nb. of modules	80	Nominal PV Power	22.0 kWp
Module area	131 m²	Maximum PV Power	21.8 kWdc
Nb. of inverters	1	Nominal AC Power	20.0 kWac

**Sub-array #1**

**Sub-array name and Orientation**

Name: Sub-array #1

Orient.: Fixed Tilted Plane

Tilt: 25°

Azimuth: 0°

**Presizing Help**

No sizing ☐ Enter planned power: 20.0 kWp

or available area(modules) ☐ 120 m²

**Select the PV module**

Available Now

Canadian Solar Inc. 275 Wp 26V Si-poly CS6K - 275P Since 2016 Manufacturer 2017

Sizing voltages: Vmpp (60°C) 26.4 V

Voc (-10°C) 42.4 V

**Select the inverter**

Available Now

Fronius International 20 kW 200 - 800 V TL 50/60Hz Symo 20.0-3-M Since 2013

Nb of MPPT inputs: 2

Operating Voltage: 200-800 V

Input maximum voltage: 1000 V

Inverter power used: 20.0 kWac

**Design the array**

**Number of modules and strings**

Mod. in series: 20

Nbre strings: 4

Overload loss: 0.0 %

Pnom ratio: 1.10

**Operating conditions**

Vmpp (60°C) 528 V

Vmpp (20°C) 632 V

Voc (-10°C) 848 V

Plane irradiance: 1000 W/m²

Impp (STC) 35.7 A

Isc (STC) 37.8 A

Isc (at STC) 37.8 A

Max. operating power at 1000 W/m² and 50°C: 19.8 kW

**Nb. modules: 80 Area: 131 m²**

**Array nom. Power (STC) 22.0 kWp**

Fonte: Captura de tela do Software PVsyst. Autoria própria.

Após a escolha da configuração do sistema fotovoltaico, deve-se definir as perdas. O software PVsyst possui 7 parâmetros para modelar as perdas do sistema fotovoltaico, sendo que a correta escolha desses parâmetros é vital para uma estimativa acurada da energia anual gerada (PVSYST, 2012).

Os 7 parâmetros de perdas adotados pelo software PVsyst são detalhados abaixo.

- Qualidade dos módulos: São as perdas referentes à variação da eficiência especificada pelos fabricantes. Como padrão, o PVsyst utiliza o valor de 0,5%.
- Perdas Ôhmicas: são as perdas relacionadas às quedas de tensão na instalação tanto no lado DC como no lado AC. O software utiliza o fator 1,5% como padrão.
- Degradação por incidência de Luz (LID): é uma perda que ocorre nas primeiras horas de exposição ao sol em módulos cristalinos e varia conforme a qualidade dos módulos de 1% a 3% (ou até mais), (THEVENARD, A., S., TURCOTTE, & POISSANT, 2010). O PVsyst considera como padrão 2% de perdas.
- Incompatibilidade (Mismatch): Os módulos apresentam diferentes características de corrente, tensão e potência. Em uma string, a corrente equivalente é definida pela menor corrente destes, sendo a produção de energia diferente da esperada. Como valor padrão, para sistemas com MPPT, o software utiliza 2,5%.
- Modificação do ângulo de incidência (IAM): Os raios solares que incidem sobre a superfície do módulo sofrem um desvio nas camadas protetoras do módulo e chegam às células fotovoltaicas com ângulo diferente. Assim, torna-se necessário corrigir a produção com base no novo ângulo de incidência.
- Acúmulo de sujeira: ao passar do tempo, é natural que sujeira seja depositada sobre o painel. Essa deposição varia conforme as condições climáticas do local, poluição, ecossistema local e frequência de manutenção e limpeza. Valores típicos variam de 5% a 10% (GSES, 2015).
- Parâmetro térmico: o software calcula as perdas relacionadas a esse parâmetro como:

$$U = U_c + U_v \times v \quad (6)$$

em que

$U$ : Condutividade térmica [W/mK]

$U_c$ : Componente constante

$U_v$ : Componente proporcional à velocidade do vento

$v$ : Velocidade do vento.

O manual do software sugere que o parâmetro  $U_v$  seja considerado nulo e fornece sugestões para valores de  $U_c$ . Para painéis instalados com livre circulação de ar por trás, o valor sugerido é de 29 W/m<sup>2</sup>.K. Para módulos semi integrados a uma construção com duto para circulação de ar na parte traseira, 20, e para módulos totalmente integrados à construção com parte traseira sem circulação de ar, 15 W/m<sup>2</sup>.K.

Com os ângulos, o sistema e as perdas definidas no software PVsyst, se inicia a simulação e obtém-se como resultado um relatório com os parâmetros mais relevantes para o projeto, entre eles, a geração diária, mensal e anual de energia.

### 3.4.2.3 *Sketchup*

Este programa foi utilizado para a modelagem 3D do Instituto Central de Ciências a fim de verificar a área disponível para a instalação do sistema fotovoltaico, além de se analisar a disposição dos módulos fotovoltaicos no telhado do referido prédio.

O Sketchup é um software de modelagem tridimensional bastante intuitivo e amigável ao usuário. Nele é possível construir modelos com alta precisão, com a possibilidade de atribuir uma localização real do desenho criado através do georreferenciamento. Além disso, a ferramenta *Shadows* do programa permite analisar o sombreamento presente no telhado do modelo, de acordo com a localização do estudo.

Além disso, o software permite a inserção de objetos de uma base de dados externa. Desta forma, foi possível importar o modelo tridimensional dos módulos fotovoltaicos utilizados no projeto e simular uma possível forma de instalação do sistema no telhado do prédio, respeitando-se a área disponível, a inclinação das placas e as distâncias necessárias para não haver sombreamento nos módulos.

#### 3.4.2.4 AutoCAD

O AutoCAD é software do tipo CAD (*Computer Aided Design*), criado e comercializado pela Autodesk, Inc. desde 1982. Ele é utilizado principalmente para a elaboração de peças de desenho técnico em duas dimensões e para criação de modelos tridimensionais. Este programa é o mais utilizado por arquitetos e engenheiro por apresentar diversas funcionalidades úteis para a área, além de ser um programa robusto e de fácil aprendizagem.

Este software foi utilizado para a visualização das plantas baixas e dos projetos dos sistemas de ar-condicionado dos anfiteatros do Instituto Central de Ciências. Com ele foi possível obter as dimensões de cada um dos anfiteatros bem como a estrutura da edificação.

Além disso, o software foi utilizado para a elaboração dos diagramas elétricos do sistema fotovoltaico projetado, permitindo um alto nível de detalhamento.

#### 3.4.2.5 Microsoft Excel

O software Microsoft Office Excel é um editor de planilhas produzido pela empresa Microsoft. Este programa possui uma interface intuitiva e capacitadas ferramentas para cálculo e construção de tabelas, características que tornaram o Excel um dos mais populares aplicativos de computador.

Neste trabalho, o software foi utilizado para realizar o fluxo de caixa e o orçamento do sistema fotovoltaico projetado, a fim de se analisar a sua viabilidade econômica. Por meio de fórmulas pré-definidas no próprio software, é possível realizar a determinação de indicadores econômicos para o fluxo de caixa elaborado, como TIR e VP. Além disso, o software possui o recurso “Tabela de Dados”, que foi utilizado na análise de sensibilidade do projeto. Esta ferramenta permite a variação de parâmetros de entrada do fluxo de caixa e retorna as saídas pré-definidas, permitindo a elaboração de gráficos para a melhor visualização da sensibilidade.

O software ainda foi utilizado para a elaboração de gráficos tanto na simulação termoenergética como no projeto fotovoltaico.



## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Este capítulo visa apresentar os resultados obtidos para a simulação termoenergética dos anfiteatros, para o projeto técnico do sistema fotovoltaico, bem como para sua análise econômica, obtidos de acordo com a metodologia exposta no Capítulo 3, além de considerações sobre estes resultados.

### **4.1 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO TERMOENERGÉTICA**

#### **4.1.1 *Coleta de dados***

Com os dados disponibilizados pelo CEPLAN – UnB, formulou-se a Tabela 5 abaixo contendo as características gerais dos anfiteatros presentes no Instituto Central de Ciências.

Tabela 5 - Dados coletados dos anfiteatros

Anfiteatro	Tipo de sistema de ar condicionado	Capacidade do sistema (BTU/h)	Marca	Potência de iluminação total (W)	Número de lugares
Anfiteatro 2	Split Cassete	4 x 36000	Carrier	2116	105
Anfiteatro 3	Split Cassete	4 x 48000	Carrier	2828	128
Anfiteatro 4	Evaporadora + Trocador de Calor + Módulos condensadores	288000	Trane	3440	198
Anfiteatro 5	Split Cassete	4 x 36000	Carrier	2116	105
Anfiteatro 6	Split Cassete	4 x 36000	Carrier	2116	105
Anfiteatro 7	Split Cassete	4 x 48000	Carrier	2900	147
Anfiteatro 8	Split Cassete	4 x 48000	Carrier	2438	146
Anfiteatro 9	-	-	-	3440	248
Anfiteatro 10	Split Cassete	4 x 48000	Carrier	2672	162
Anfiteatro 11	-	-	-	2600	147
Anfiteatro 12	Evaporadora + Trocador de Calor + Módulos condensadores	288000	Trane	3440	242
Anfiteatro 13	Split Cassete	4 x 48000	Carrier	2828	147
Anfiteatro 14	Split Cassete	4 x 48000	Carrier	2900	147
Anfiteatro 15	Split Cassete	4 x 36000	Carrier	2116	105
Anfiteatro 16	Split Cassete	4 x 36000	Carrier	2116	105
Anfiteatro 17	-	-	-	2600	147
Anfiteatro 18	Split Cassete	4 x 48000	Carrier	2828	147
Anfiteatro 19	Split Cassete	4 x 36000	Carrier	2116	105

A partir destes dados coletados e das plantas baixas do Instituto Central de Ciências disponibilizadas, foi possível realizar a simulação termoenergética dos anfiteatros deste prédio.

#### **4.1.2 Modelagem em 3D do edifício**

No software DesignBuilder, o Instituto Central de Ciências da Universidade de Brasília foi modelado tridimensionalmente.

Figura 22 - Modelo tridimensional do ICC elaborado no DesignBuilder.

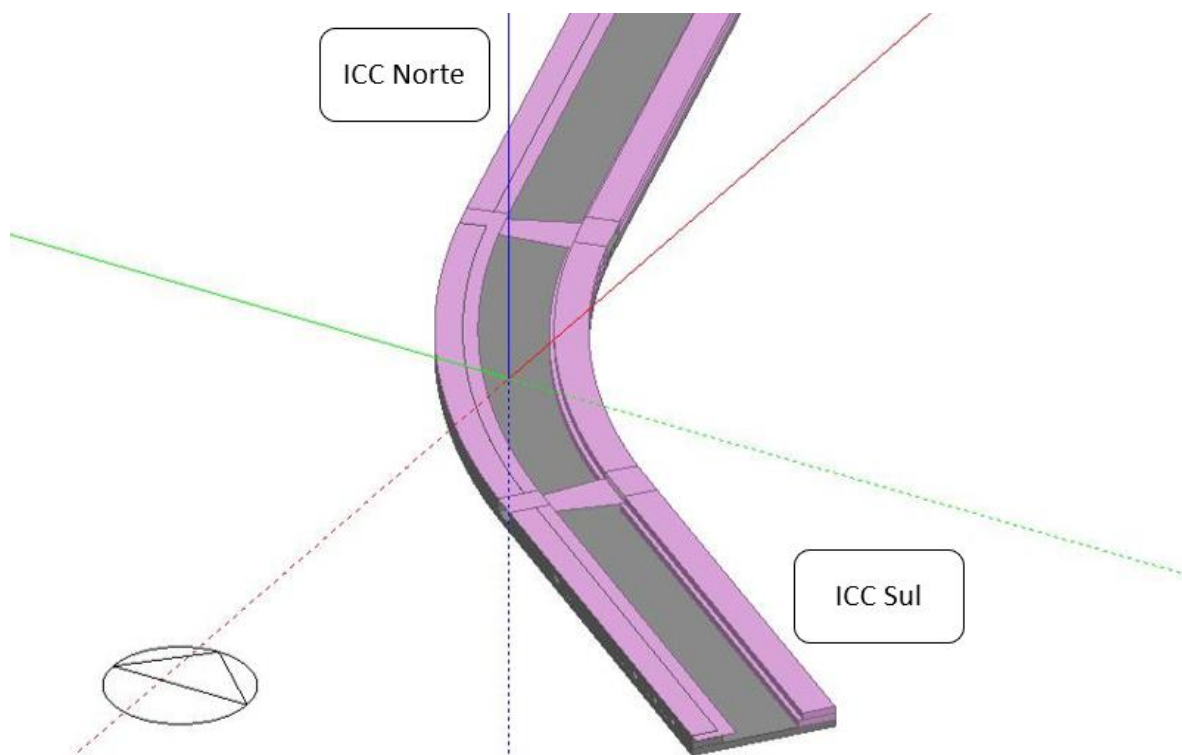


Figura 23 - Modelagem do ICC renderizada .



Figura 24 - Detalhe do ICC Sul no modelo.

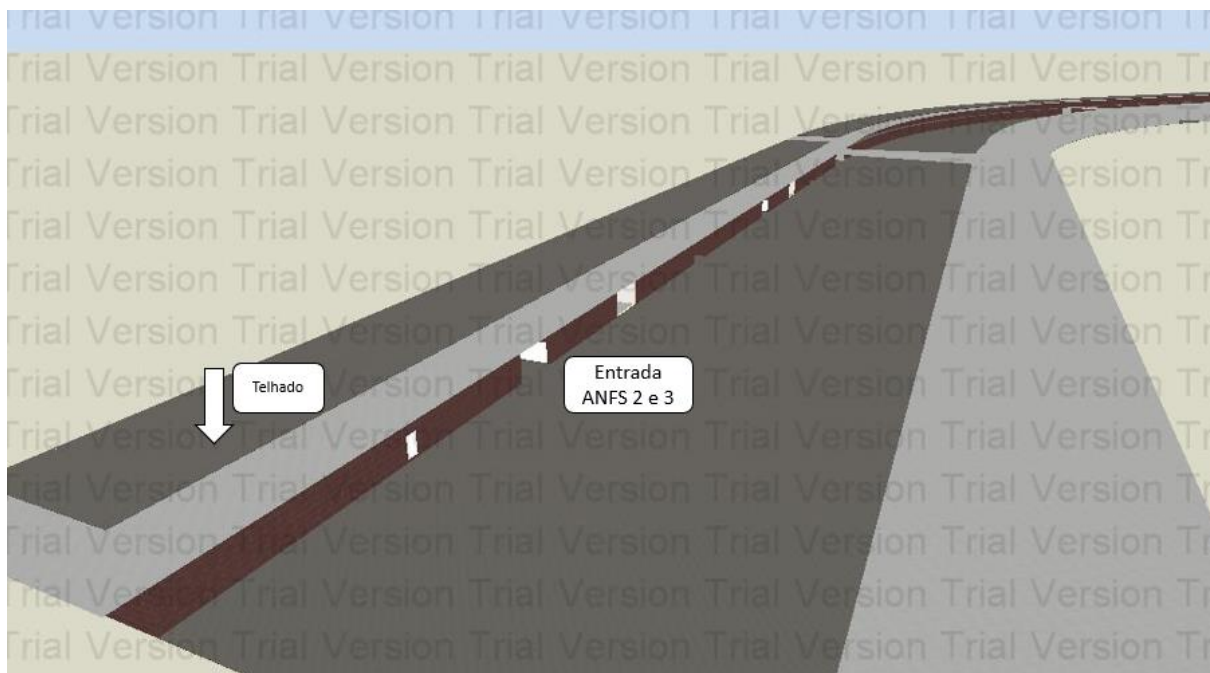


Figura 25 - Entrada do anfiteatro 3 no prédio simulado.



Ressalta-se novamente que os anfiteatros modelados ocupam apenas a Ala Sul do Instituto Central de Ciências.

### 4.1.3 Modelagem dos anfiteatros

Para realizar a modelagem tridimensional dos anfiteatros, buscou-se simplificar a simulação buscando semelhanças entre os ambientes de interesse. Analisando os dados obtidos na Tabela 5, percebe-se semelhanças entre os anfiteatros tanto no número máximo de ocupantes, como nos equipamentos de ar condicionado e na iluminação.

Com isto, utilizando a ferramenta “Zone Multiplier” do software DesignBuilder, podemos modelar o ambiente apenas uma vez e atribuir os resultados para todos aqueles que são semelhantes, sem prejuízos relevantes para a análise. Foram escolhidos os anfiteatros mais representativos entre os 18 para serem modelados, conforme a Tabela 6 abaixo. Foram estruturados todos os anfiteatros que serão modelados e todos aqueles que são semelhantes a eles.

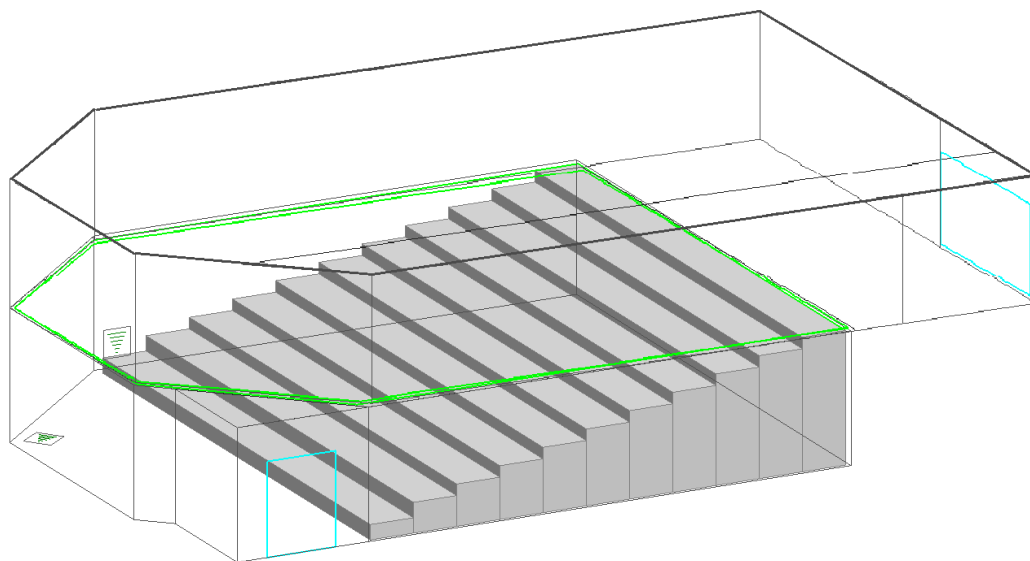
Tabela 6 - Anfiteatros semelhantes aos anfiteatros que serão modelados

Anfiteatro a ser modelado	Anfiteatros semelhantes	Multiplicador
Anfiteatro 2	Anfiteatros 5, 6, 15, 16 e 19	6
Anfiteatro 3	Nenhum	1
Anfiteatro 4	Anfiteatro 12	2
Anfiteatro 7	Anfiteatros 8, 10, 13, 14 e 18	6
Anfiteatro 11	Anfiteatros 9 e 17	3

Desta forma, ao se obter os resultados para o consumo de energia do anfiteatro 2, eles serão multiplicados por 6, atribuindo-os também aos anfiteatros 5, 6, 15, 16 e 19. O mesmo será feito para os outros anfiteatros modelados, podendo-se assim obter o consumo de energia de todos os 18 anfiteatros do ICC.

Como dito anteriormente, pelos anfiteatros estarem tanto no subsolo como no térreo, foi necessário realizar a modelagem utilizando 2 blocos sobrepostos. Para ligar os blocos e criar apenas uma zona térmica, foi criado um buraco no piso do térreo, respeitando as dimensões reais do ambiente. Esse “buraco” criado é o retângulo em verde destacado na Figura 26.

Figura 26 - Modelagem tridimensional do anfiteatro 4 no software DesignBuilder.



No anfiteatro 4 tem-se duas portas, uma no nível térreo e a outra no subsolo. A portas são os retângulos azuis nas figuras acima.

Para a modelagem dos anfiteatros 2, 3 e 7, as mesmas considerações foram feitas.

Para o anfiteatro 11, como não existe sistema de ar condicionado neste ambiente, a modelagem não precisa ser arquitetonicamente fiel à realidade, já que o consumo de energia deste anfiteatro se dará basicamente por iluminação e tomadas. Sendo assim, a envoltória do anfiteatro 11 foi modelada apenas no térreo, não modelando-a no subsolo, já que o comportamento térmico do ambiente não é relevante para a análise do consumo de energia.

Na Tabela 7 estão dispostos os dados construtivos dos anfiteatros simulados.

Tabela 7 - Dados construtivos dos anfiteatros simulados

Local	Área (m <sup>2</sup> )	Número de portas	Número de janelas
Anfiteatro 2	219,41	1	0
Anfiteatro 3	229,45	2	0
Anfiteatro 4	314,97	2	0
Anfiteatro 7	233,35	2	0
Anfiteatro 11	220,5	1	0

Como citado, as salas adjacentes dos anfiteatros em nível térreo foram modeladas utilizando templates do próprio software.

#### **4.1.4 Simulação da carga térmica**

No software DesignBuilder foi realizado o cálculo da carga térmica dos anfiteatros simulados. A partir da metodologia descrita na seção 3.1.6, os resultados foram obtidos.

Tabela 8 - Resultados obtidos para o cálculo da carga térmica

<b>Local</b>	<b>Carga térmica simulada (kW)</b>	<b>Capacidade sugerida para o sistema (kW)</b>
Anfiteatro 2	37,63	43,28
Anfiteatro 3	45,48	52,30
Anfiteatro 4	71,15	81,82
Anfiteatro 7	50,88	58,52

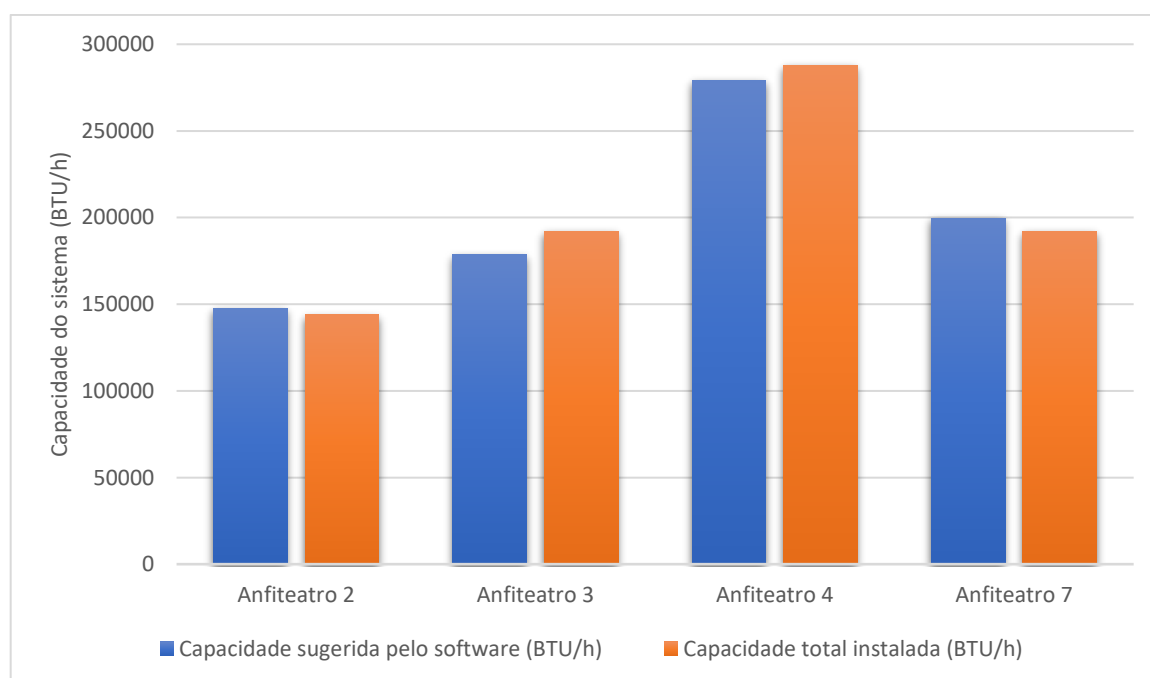
Percebe-se que a carga térmica é proporcional ao número de ocupantes e à potência de iluminação de cada anfiteatro, conforme esperado. O anfiteatro 2, por ser o menor e com menos iluminação, é o que possui menor carga térmica. O anfiteatro 4, analogamente, possui maior carga térmica. O anfiteatro 7 é ligeiramente maior que o 3, assim como a carga térmica calculada pelo software.

Além da carga térmica, o software sugere a potência de um sistema de ar condicionado capaz de atender o ambiente simulado. Para tornar a análise mais clara, sabendo que 1 KW equivale à 3412,142 BTU/hr, convertemos as unidades da capacidade sugerida pelo software e comparamos com a potência dos aparelhos instalados nos anfiteatros. Os valores foram inseridos na Figura 27 e na Tabela 9, onde foi também calculada a diferença percentual entre os valores.

Tabela 9 - Comparação entre a potência sugerida pelo software e a potência instalada dos sistemas de ar condicionado dos anfiteatros modelados.

	Potência sugerida pelo Software (BTU/h)	Potência total instalada (BTU/h)	Diferença percentual
Anfiteatro 2	147 677,51	144 000	2,55%
Anfiteatro 3	178 455,03	192 000	7,05%
Anfiteatro 4	279 181,45	288 000	3,06%
Anfiteatro 7	199 678,55	192 000	4,00%

Figura 27 - Comparação entre a capacidade sugerida e a capacidade instalada nos anfiteatros modelados.



Percebe-se pelos resultados apresentados que os sistemas de ar-condicionado sugeridos pelo software são bastante próximos dos sistemas instalados, indicando que a carga térmica calculada pelo programa é semelhante à carga térmica calculada pelos projetistas que realizaram o projeto dos anfiteatros do ICC. A maior discrepância observada é no resultado obtido para o anfiteatro 3, de 7,05%, um valor aceitável para



a engenharia. Entretanto, como nenhum memorial de cálculo dos projetos foi disponibilizado, não é possível realizar uma maior discussão sobre o resultado obtido.

Observando os projetos instalados nos anfiteatros, verificou-se que os sistemas reais instalados nos anfiteatros 2, 3 e 7 não são capazes de suprir a vazão de ar exterior necessária para manter a qualidade mínima do ar dentro desses ambientes, conforme a norma NBR 16401-3. Nos anfiteatros citados, a caixa de ventilação responsável pela entrada de ar exterior possui vazão nominal de 1360 m<sup>3</sup>/h, valor completamente abaixo do necessário, mesmo desconsiderando as diversas perdas mecânicas existentes.

Um cenário mais favorável seria utilizar um valor da Resolução n° 9 da Anvisa, onde a taxa mínima de renovação de ar para ambientes com alta rotatividade é de 17 m<sup>3</sup>/h/pessoa. Mesmo assim, os sistemas destes anfiteatros ficam abaixo do desejado, mostrando que os sistemas destes anfiteatros não atendem às exigências mínimas para manter a qualidade do ar, mesmo considerando o cenário mais favorável.

Ressalta-se que a qualidade do ambiente interno tem impacto direto na produtividade das pessoas e no rendimento de processos de aprendizagem, fortemente influenciados pelo sentimento de bem-estar dos ocupantes. Em ambientes climatizados com uma alta densidade de pessoas, o ar é respirado várias vezes. Isso promove um aumento na quantidade de gás carbônico e diminuição do oxigênio, causando sonolência e dores de cabeça. A falta da renovação de ar em ambientes climatizados também é propícia para a disseminação de vírus e bactérias.

#### **4.1.5 Validação do consumo de energia**

Para realizar a modelagem dos sistemas de ar-condicionado dos anfiteatros, considerou-se as capacidades dos equipamentos instalados nestes ambientes e as vazões de ar de renovação de acordo com o explicado na seção 3.1.7.

Com isto, deve-se agora validar a modelagem realizada destes equipamentos e seu respectivo consumo de energia. Para isto, foi realizada a medição do consumo de energia do sistema de ar condicionado do anfiteatro 2 no dia 21 de junho de 2018, conforme descrito na seção 3.1.8.1, e comparada com a simulação realizada deste dia no software DesignBuilder, conforme descrito na seção 3.1.8.2.

#### 4.1.5.1 *Medição do consumo de energia*

Na Tabela 10 abaixo estão dispostos os valores de energia medidos e o número de pessoas contabilizados a cada 15 minutos durante o período.

Tabela 10 – Valores das medições realizadas

<b>Horário</b>	<b>Energia condensadora (kWh)</b>	<b>Energia evaporadora (kWh)</b>	<b>Energia medida (kWh)</b>	<b>Energia total (kWh)</b>	<b>Nº de pessoas</b>
14:00	0	0	0,00	0,00	16
14:15	0,7	0,6	1,30	2,60	21
14:30	1,2	1,0	2,22	4,45	21
14:45	1,6	1,4	2,96	5,93	22
15:00	2,1	1,8	3,89	7,78	23
15:15	2,7	2,3	5,00	10,00	23
15:30	3,1	2,6	5,74	11,48	23
15:45	3,5	3,0	6,50	13,00	18
16:00	3,8	3,2	7,01	14,03	33
16:15	4,1	3,5	7,60	15,20	41
16:30	4,5	3,9	8,40	16,80	45
16:45	4,9	4,2	9,10	18,20	45
17:00	5,4	4,7	10,10	20,20	43

Ressalta-se novamente que apenas metade do sistema foi medido, sendo que todo o sistema foi considerado como simétrico, ou seja, o valor total do consumo é o dobro do valor registrado nos medidores. Assim, ao final das 3 horas de medição, estimou-se que o consumo de energia do sistema de ar condicionado do anfiteatro 2 foi de 20,2 KWh.

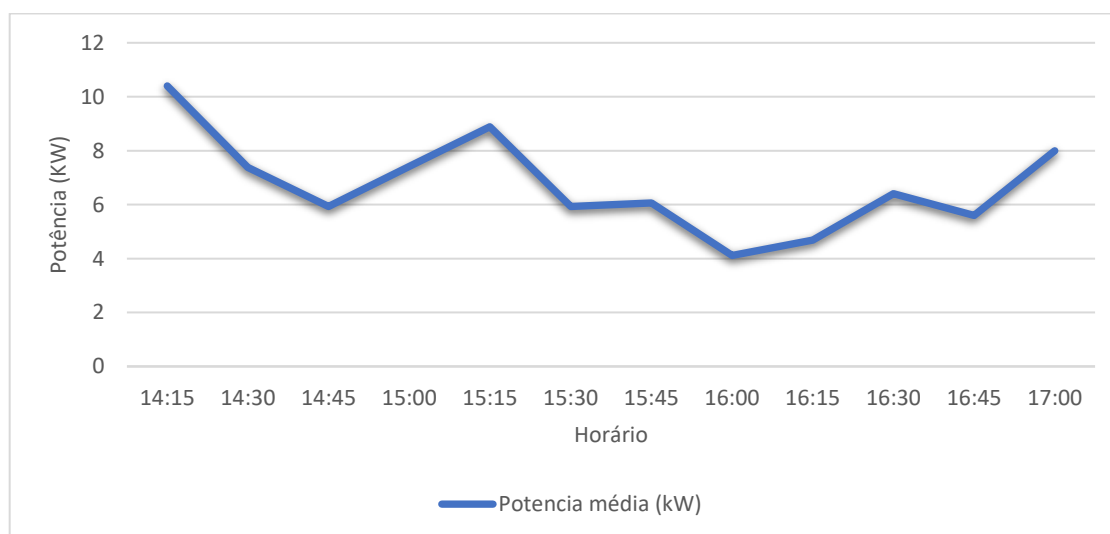
Como os valores medidos foram registrados a cada 15 minutos, podemos calcular uma potência elétrica média do sistema, bastando dividir os valores encontrados por 0,25 hora. Desta forma, obtém-se a potência média de todo o sistema de resfriamento para cada intervalo de 15 minutos, inserindo-os na Tabela 11 abaixo.

Tabela 11 – Valores de energia medida e potência média calculada.

Horário	Energia total medida (KWh)	Potência média (kW)
14:00	0,00	0
14:15	2,60	10,4
14:30	4,45	7,3825
14:45	5,93	5,9275
15:00	7,78	7,4093
15:15	10,00	8,8912
15:30	11,48	5,9275
15:45	13,00	6,0617
16:00	14,03	4,1152
16:15	15,20	4,6848
16:30	16,80	6,4
16:45	18,20	5,6
17:00	20,20	8,0

Com os dados da Tabela 11, obtém-se o gráfico da Figura 28 abaixo.

Figura 28 – Gráfico da potência média calculada a partir das medições realizadas.



Observa-se que o maior pico de consumo ocorre no começo das medições. Isto se deve ao fato de que, como o sistema de ar condicionado só foi ligado às 14 horas, o ambiente estava razoavelmente quente. Como o aparelho foi configurado para operar em 23° C, ele se manteve ligado durante os primeiros minutos, até atingir esta temperatura e desligar momentaneamente. Em sistemas de ar condicionado deste tipo, quando o termostato mede a temperatura configurada, o aparelho desliga

momentaneamente, retornando apenas quando é indicado uma temperatura levemente superior no ambiente.

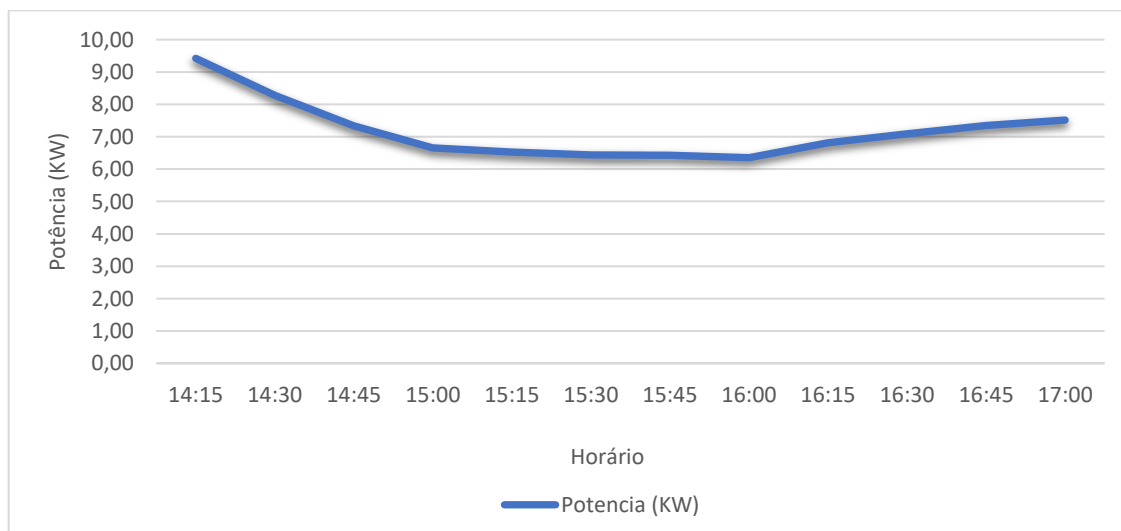
Verifica-se que a potência nominal de cada aparelho neste anfiteatro é de 3482W e, como são quatro aparelhos, temos um sistema de 13,93kW. Assim, como a potência média estimada nos 15 minutos iniciais é de 10,4kW, observa-se que o aparelho ficou a maior parte deste período ligado. O menor valor de potência média ocorre próximo às 16 horas, período em que houve a troca de turmas e o anfiteatro ficou a maior parte do tempo vazio. A partir deste horário, o número de alunos aumenta sucessivamente, assim como a potência média do sistema.

#### 4.1.5.2 Simulação das medições

Com o modelo do sistema de ar condicionado do anfiteatro 2, os dados climáticos do dia 21 de junho de 2018 inseridos no software DesignBuilder e com o número de ocupantes contabilizados no período das medições, a simulação do consumo de energia do sistema de ar condicionado deste anfiteatro foi realizada. Os resultados obtidos são mostrados abaixo.

Plotou-se na Figura 29 o gráfico da potência do sistema de ar condicionado simulado entre as 14 e 17 horas, período no qual ele foi ligado. Nesta etapa, o software calcula a potência elétrica do sistema a cada 15 minutos, fornecendo ao final, o consumo de energia elétrica do aparelho simulado.

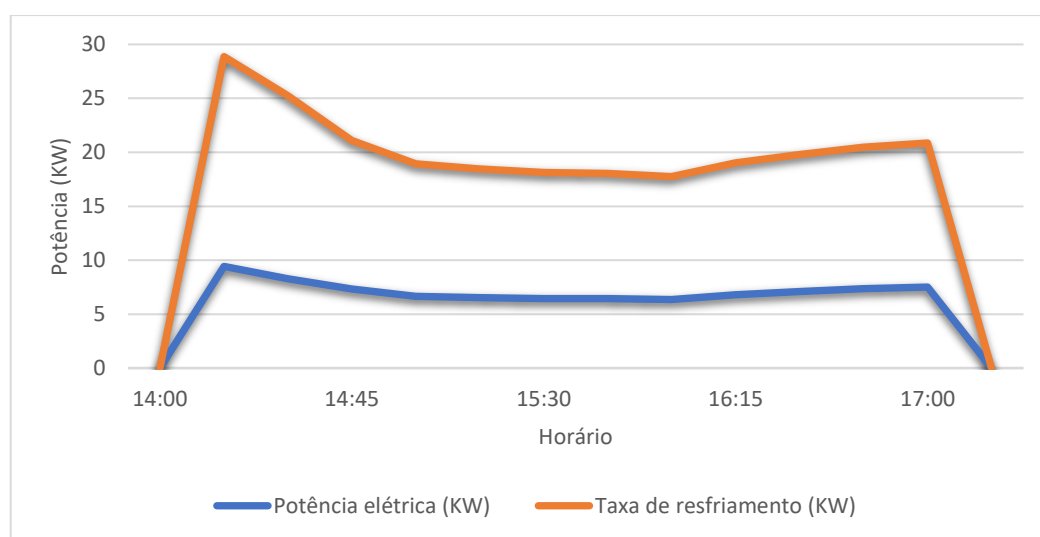
Figura 29 - Potência simulada do sistema de ar condicionado do anfiteatro 2 para o período das medições.



Observa-se um pico de potência no começo do período de simulação, conforme medido. Em seguida, há a natural queda no consumo, permanecendo praticamente constante até as 16 horas. Neste horário, quando ocorre a troca de turmas e o número de ocupantes aumenta, cresce também a carga térmica do ambiente, fazendo com que o sistema de ar condicionado a acompanhe.

Também foi obtida a relação da potência elétrica do sistema de ar condicionado simulado com a sua taxa de resfriamento, ou seja, seu COP. Com os dados obtidos, gerou-se o gráfico da Figura 30.

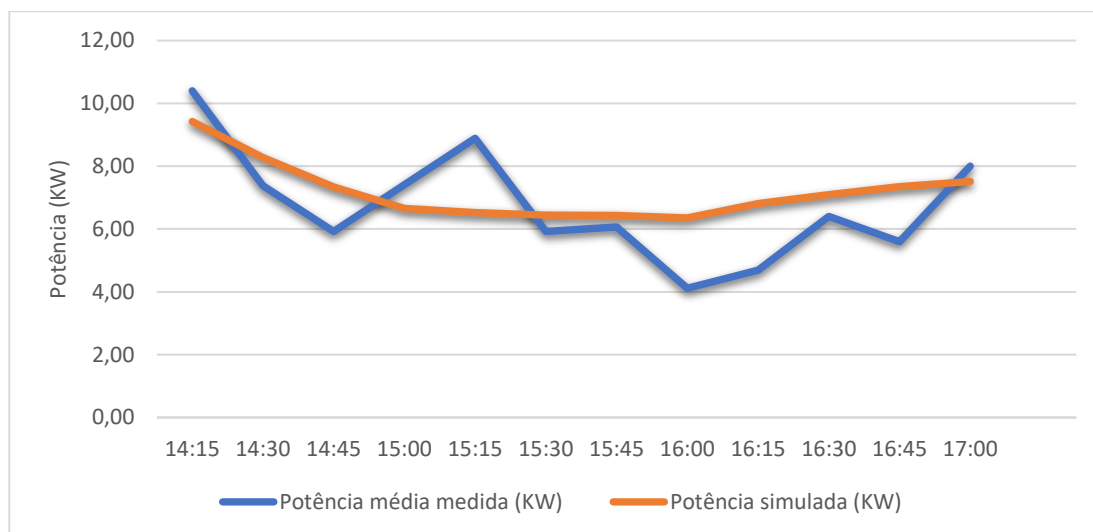
Figura 30 – Relação entre a potência elétrica do aparelho de ar condicionado simulado e a taxa de resfriamento (COP).



Observa-se que o COP do sistema simulado não é constante. Em sistemas de ar condicionado reais, o COP sofre pequenas variações quando há mudanças na carga. Na simulação, estas variações foram simuladas utilizando valores típicos para sistemas do tipo Split, aproveitando o template disponível no próprio software. É fácil observar que o maior COP se dá quando o sistema se aproxima de sua carga nominal, ou seja, no começo do período analisado.

Por fim, para a melhor comparar a simulação realizada com as medições feitas, plotou-se o gráfico da Figura 31.

Figura 31 – Comparação entre a potência média simulada e a potência média do aparelho real.



Pode-se notar que a simulação do sistema de ar condicionado apresenta um gráfico muito mais suave e linear do que os valores apresentados pela medição. Observa-se uma discrepância entre as potências médias no decorrer do tempo, apesar de que, ao final do período a energia consumida no sistema simulado é muito próxima do valor medido, como pode ser visto abaixo.

Tabela 12 – Consumo de energia simulada e medida do aparelho de ar condicionado do Anfiteatro 2.

Consumo de energia simulado (kWh)	Consumo de energia medido (kWh)	Diferença percentual
21,724	20,2	7,545%

A diferença de 7,545% entre a energia medida e a energia simulada, considerando todas as simplificações feitas, é um resultado satisfatório, demonstrando a capacidade da modelagem realizada. Conforme esperado, o consumo de energia simulado é ligeiramente superior ao consumo medido, muito por causa da simplificação realizada referente à vazão do ar de renovação.

Com este resultado, pode-se afirmar que a simulação termoenergética realizada para os anfiteatros do Instituto Central de Ciências está validada.

#### 4.1.6 Simulação do consumo anual de energia dos anfiteatros

Com a modelagem validada, a próxima etapa foi obter o consumo de energia anual dos anfiteatros simulados, considerando as observações feitas na seção 3.1.9. Abaixo são mostrados os valores de consumo em cada mês para os anfiteatros 2, 3, 4, 7 e 11, respectivamente.

Figura 32 - Consumo de energia do anfiteatro 2

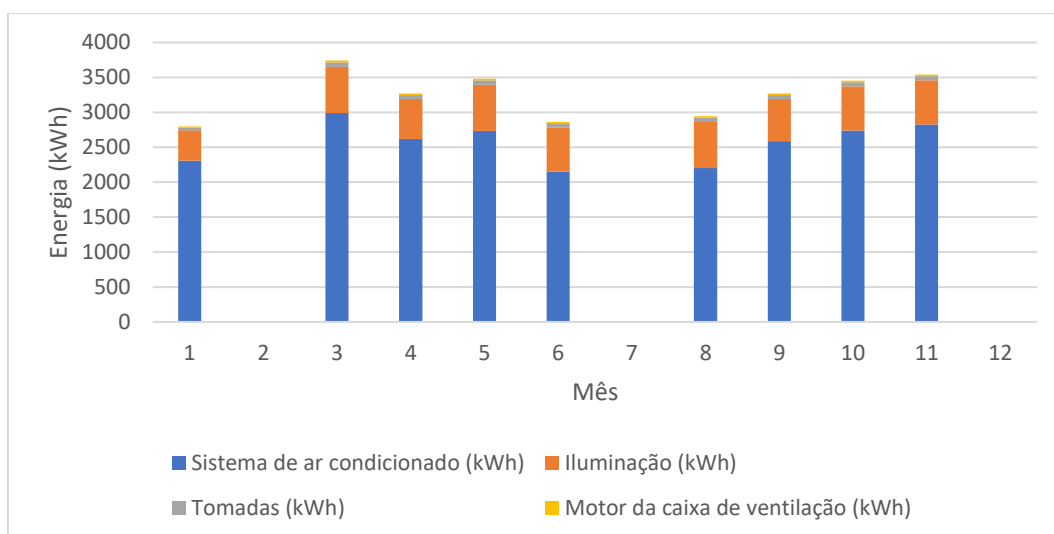


Figura 33 - Consumo de energia do anfiteatro 3

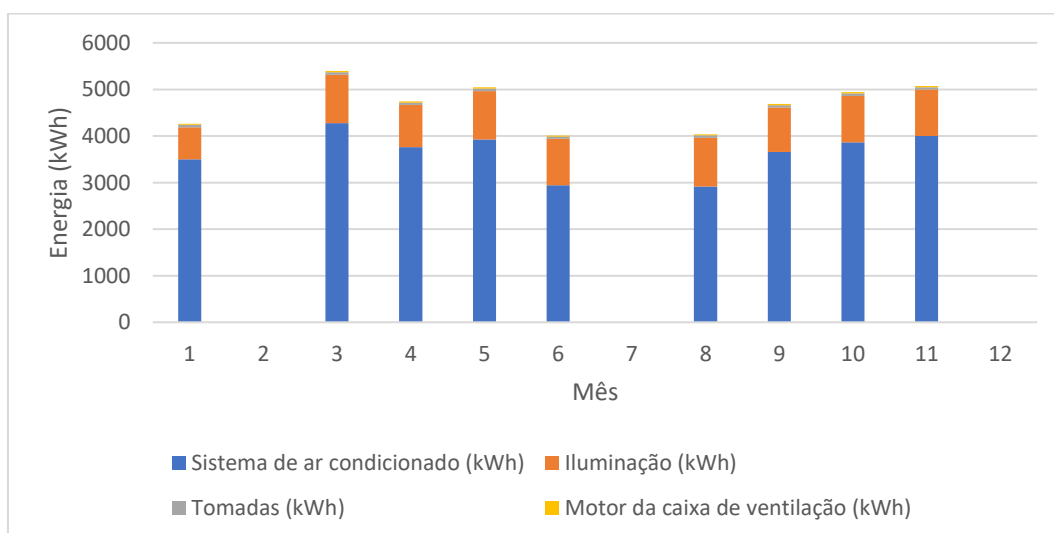


Figura 34 - Consumo de energia do anfiteatro 4

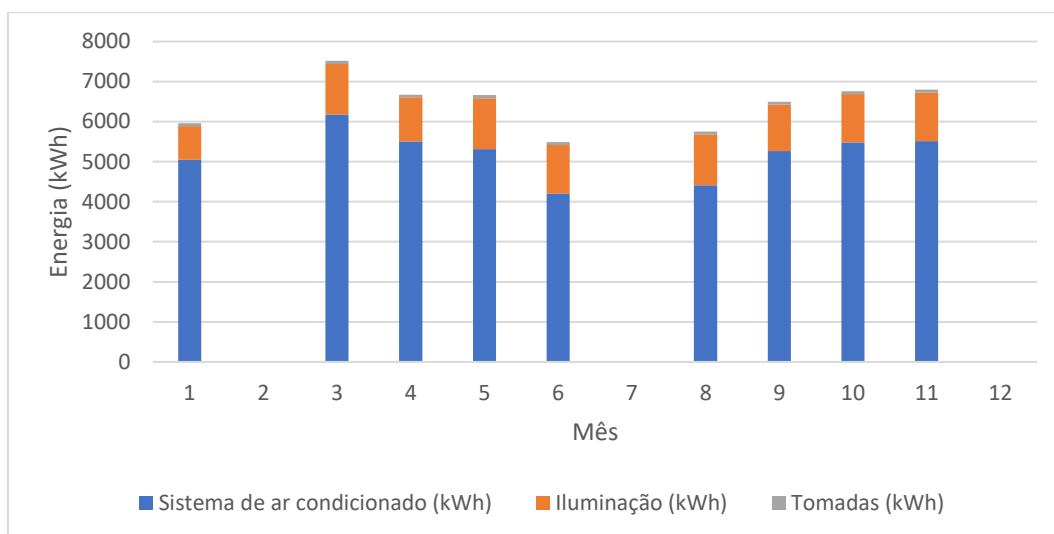


Figura 35 - Consumo de energia do anfiteatro 7

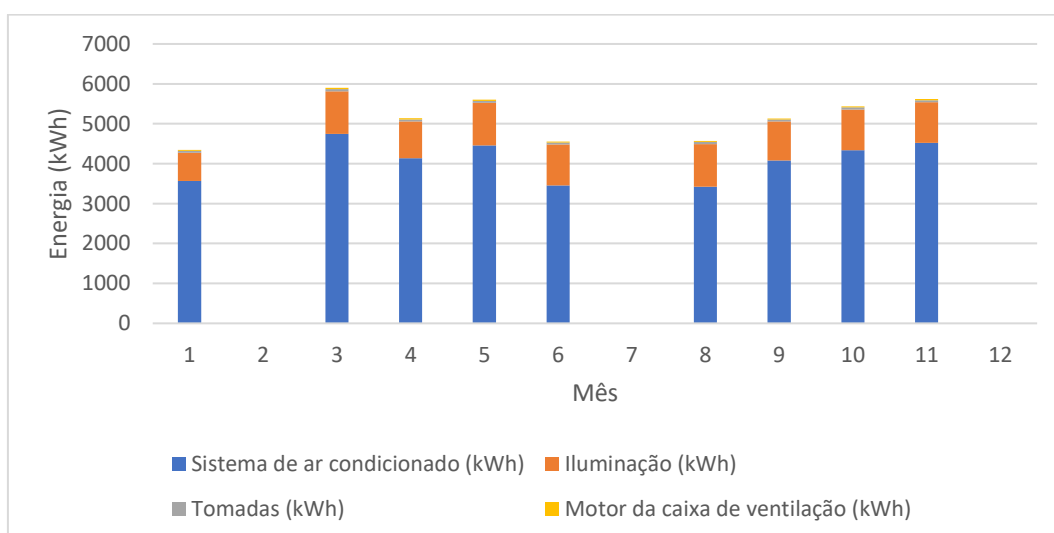
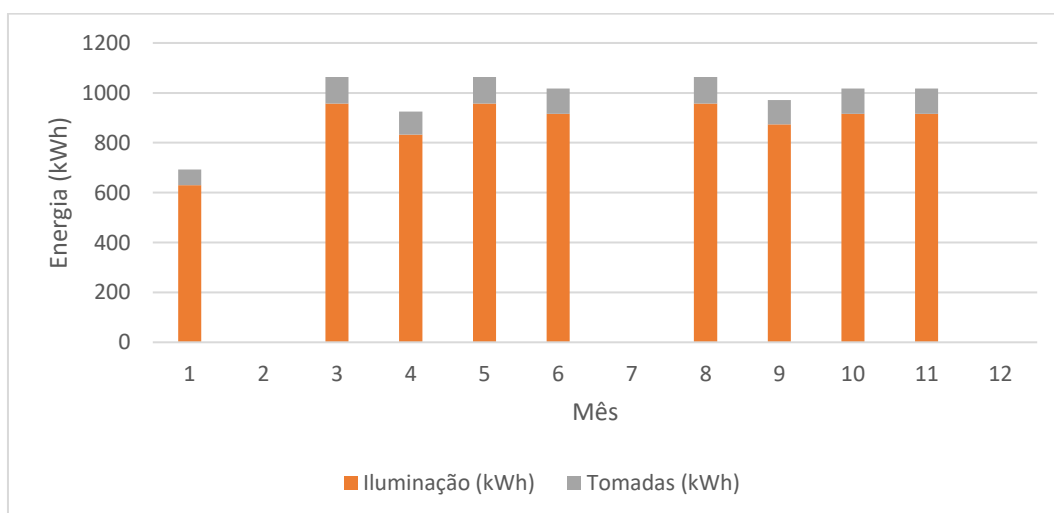


Figura 36 - Consumo de energia do anfiteatro 11.





Percebe-se pelas figuras acima que o maior responsável pelo consumo de energia dos anfiteatros é o sistema de ar condicionado, com exceção do anfiteatro 11, que não o possui. Este alto valor é ocasionado pelo fato de que os sistemas de ar condicionado foram considerados em operação em todos os anfiteatros nos períodos em que há aula, promovendo o conforto térmico de acordo com as especificações estabelecidas na Resolução nº 9 da Anvisa e nas normas NBR 16401.

Observando as especificações técnicas dos sistemas AVAC presentes nos anfiteatros, conclui-se que estes aparelhos são extremamente ineficientes. Os equipamentos presentes nos anfiteatros 2, 3 e 7, com COP de 2,98, são classificados como de classe C no Selo PROCEL de economia de Energia, conforme Figura 37.

Figura 37 - Selo PROCEL de economia de energia para condicionadores de ar Split Cassete.

CONDICIONADORES DE AR SPLIT CASSETTE				Data atualização: 22/5/2017			
Classes	Coeficiente de eficiência energética (W/W)			Split Cassete			
				Rotação Fixa		Rotação Variável	
<b>A</b>	3,23	<CEE		9	5,0%	20	62,5%
<b>B</b>	3,02	<CEE≤	3,23	37	20,7%	9	28,1%
<b>C</b>	2,81	<CEE≤	3,02	97	54,2%	1	3,1%
<b>D</b>	2,60	≤CEE≤	2,81	36	20,1%	2	6,3%

Fonte: PROCEL. Disponível em:

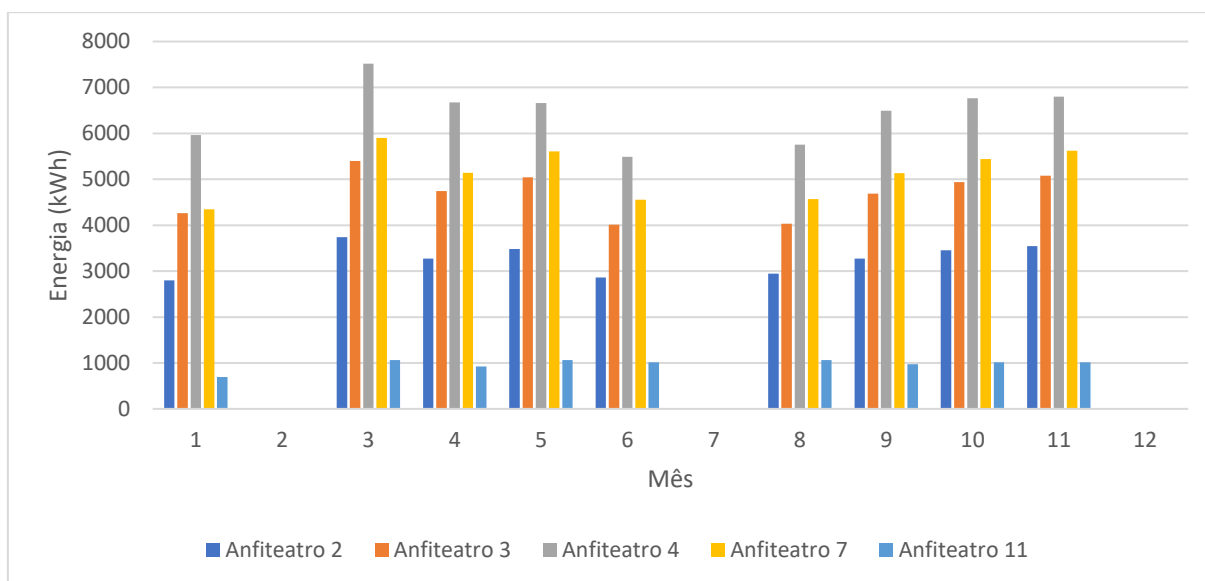
[http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/condicionadores\\_ar\\_cassete\\_indice-novo.pdf](http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/condicionadores_ar_cassete_indice-novo.pdf). Acesso em: 16 de novembro de 2018.

É fácil perceber que a utilização de sistemas de ar-condicionado mais eficientes provocaria enorme economia de energia, já que estes aparelhos são os grandes responsáveis pelo consumo nestes ambientes.

Além disso, verifica-se que o consumo das tomadas e do motor da caixa de ventilação são irrisórios quando comparados com os valores do sistema de ar condicionado e da iluminação.

Agrupando os resultados obtidos em um único gráfico, tem-se Figura 38 abaixo.

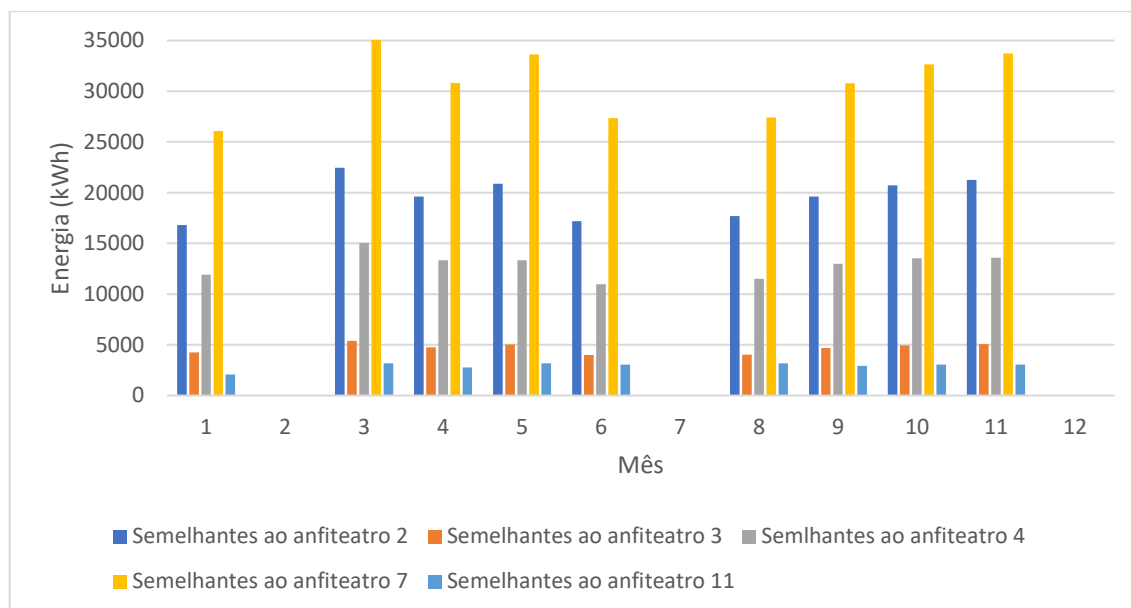
Figura 38 - Consumo de todos os anfiteatros modelados



Como pode ser observado, o anfiteatro que mais consome energia é o anfiteatro 4, conforme esperado, já que ele possui o sistema de ar condicionado e carga de iluminação com maior potência. O que menos consome energia é o anfiteatro 11, que não possui sistema de ar condicionado, sendo seu consumo composto apenas por iluminação e tomadas.

Utilizando a ferramenta “Zone Multiplier” do software DesignBuilder e com os fatores multiplicadores apresentados na Tabela 6, podemos atribuir os resultados mostrados na Figura 38 para todos os anfiteatros semelhantes aos ambientes modelados. Desta forma, o consumo de todos os anfiteatros do Instituto Central de Ciências é obtido, sendo então mostrado na Figura 39 abaixo.

Figura 39 - Consumo de energia elétrica de todos os anfiteatros do Instituto Central de Ciências da Universidade de Brasília.



Observa-se que os maiores consumidores de energia são os anfiteatros semelhantes ao 7 e ao 2, que estão em maior número. Este resultado está coerente com o esperado. Os anfiteatros semelhantes aos ambientes simulados foram mostrados na Tabela 6.

Somando os valores de energia da Figura 39, temos que o consumo de energia elétrica anual de todos os anfiteatros do Instituto Central de Ciências é de **639,04 MWh**. Este valor foi utilizado para realizar o dimensionamento do sistema fotovoltaico no telhado do referido prédio.

Com as contas de energia da Universidade de Brasília fornecidas pelas prefeituras, tem-se que a UnB consumiu entre maio de 2017 e abril de 2018 o valor de 21,856 GWh. Ou seja, o consumo anual dos anfiteatros obtido na simulação termoenergética representa cerca de 2,92% do consumo anual total da universidade.

Além do consumo de energia anual, foi obtida também a curva de carga típica dos anfiteatros do ICC. Foram simulados os dias de 1 a 10 de março e realizou-se a média por horário da potência dos equipamentos de cada anfiteatro em dias de aula neste período, obtendo-se assim valores típicos para a curva de carga em um dia normal. Ressalta-se que, como as cargas e as ocupações são aproximadamente as mesmas para todos os períodos com aula, podemos assumir que os resultados obtidos nesta análise podem ser aplicados para todos os dias de aula do ano, sem grandes prejuízos para a análise.

Para o anfiteatro 2, os resultados são apresentados abaixo.

Figura 40 - Potência dos equipamentos do anfiteatro 2 em um dia típico.

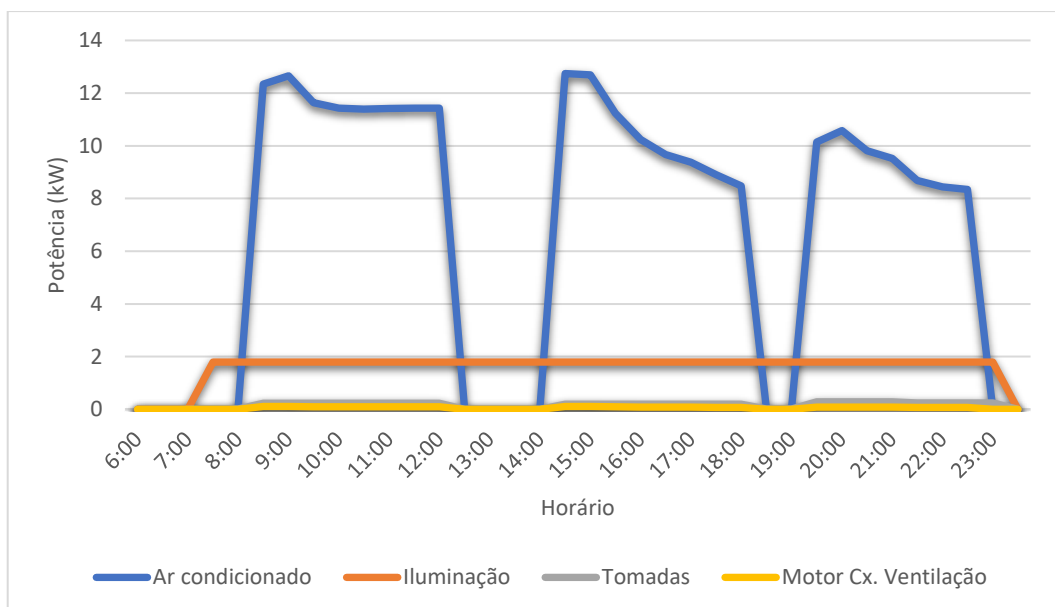
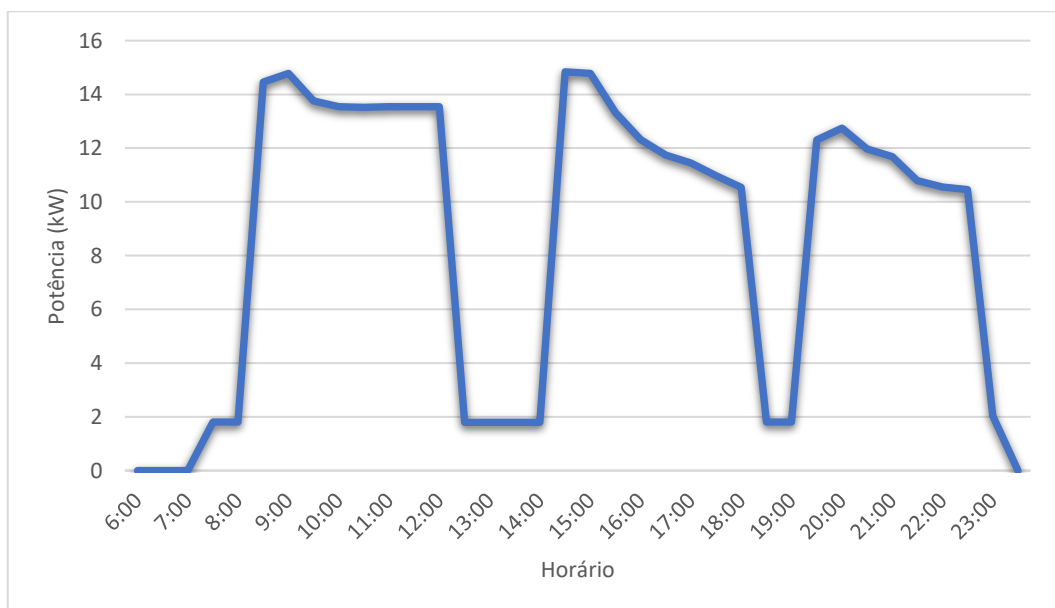


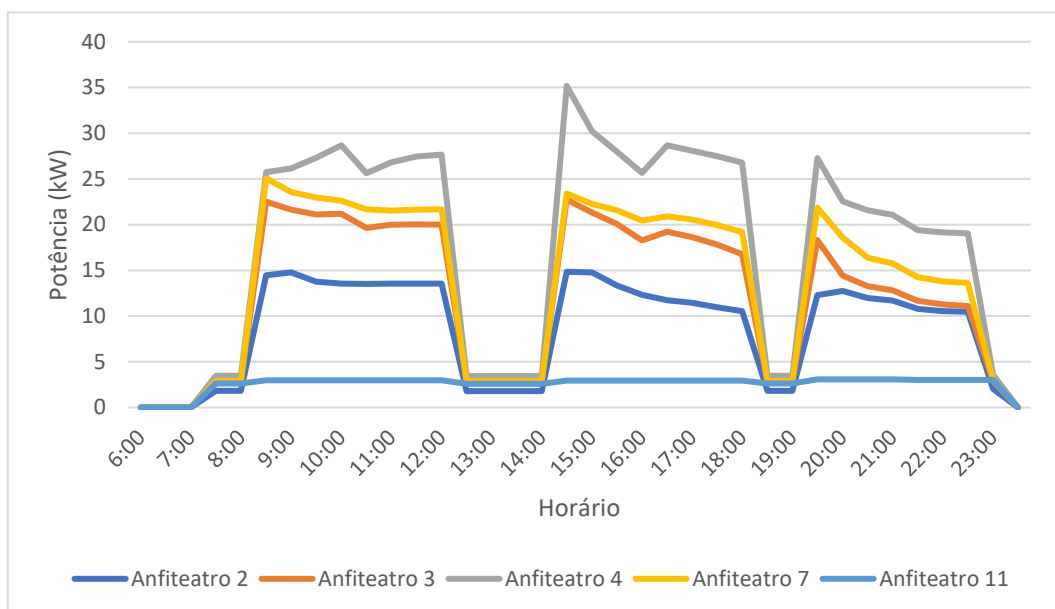
Figura 41 - Curva de carga simulada para o anfiteatro 2



Pelas figuras acima, fica claro novamente como o ar condicionado é o grande responsável pelo consumo de energia dos anfiteatros. É possível observar nos gráficos os períodos em que o sistema de ar condicionado não é utilizado no anfiteatro. Os picos de potência ocorrem no momento em que o ar condicionado é ligado pela primeira vez no dia, às 8 horas, e após o período de almoço, às 14 e 15 horas.

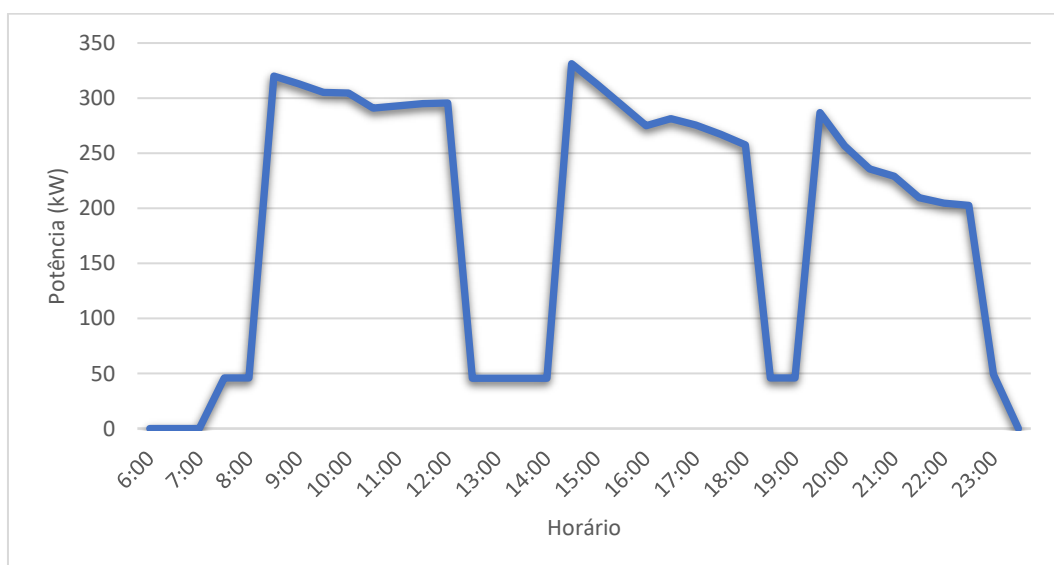
Aplicando o mesmo procedimento para os anfiteatros 3, 4, 7 e 11, temos as curvas da Figura 42.

Figura 42 - Simulação das curvas de carga para os anfiteatros modelados.



Utilizando os fatores multiplicadores mostrados na Tabela 6 e os dados da Figura 42, pode-se obter a curva de carga simulada para todos os anfiteatros do Instituto Central de Ciências em um dia normal de aula, mostrado na Figura 43.

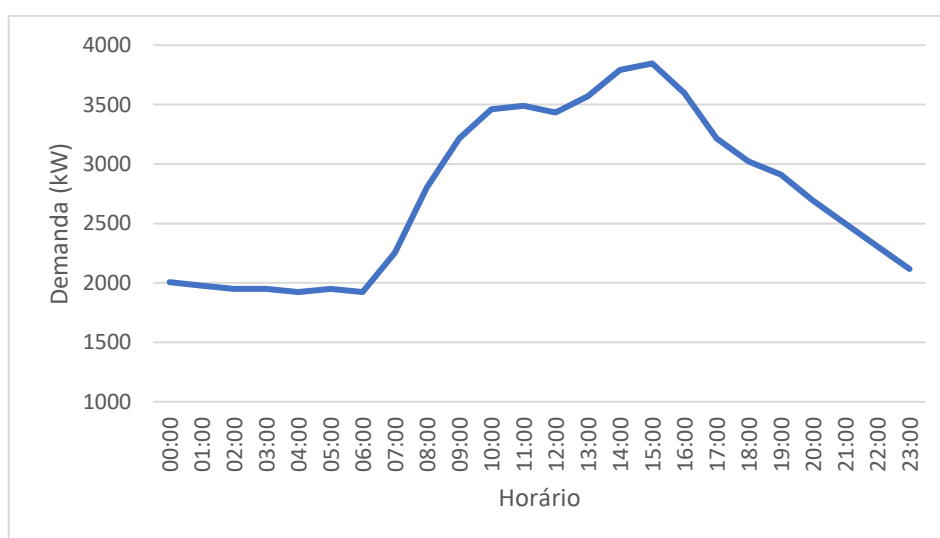
Figura 43 - Simulação da curva de carga para todos os anfiteatros do Instituto Central de Ciências.



Como pode ser observado, o maior pico de potência do dia ocorre entre as 14 e 15 horas, período normalmente com as maiores temperaturas externas, o que resulta em uma maior carga térmica nos ambientes.

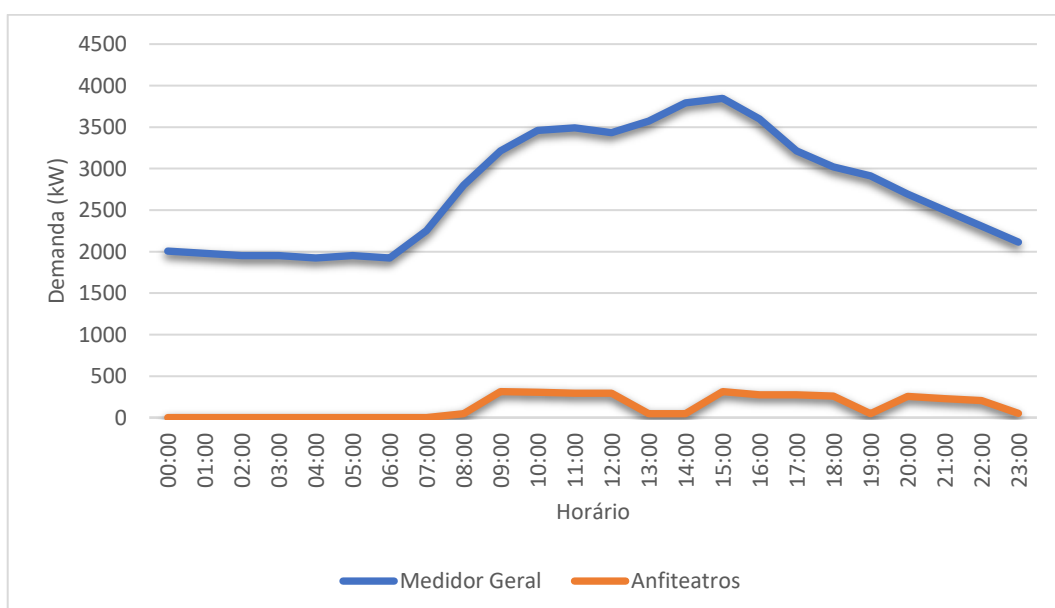
A fim de comparação, a curva de carga simulada foi plotada juntamente com a curva de carga do medidor geral da Universidade de Brasília em 2017, obtida por Gregório (2017). A curva de carga citada está plotada na Figura 44 e a comparação é feita na Figura 45.

Figura 44 - Curva de carga do medidor geral da UnB em 2017 em dias úteis.



Fonte: Gregório (2017).

Figura 45 - Comparação entre a curva de carga do medidor geral e da curva de carga simulada dos anfiteatros do ICC



Percebe-se que os valores da curva de carga simulada para os anfiteatros correspondem a menos de 10% dos valores da curva de carga do medidor geral da universidade.

Como a Universidade de Brasília é cobrada pela concessionária de energia como Tarifa Horo-Sazonal Azul, classe A4, a conta de energia engloba tanto o consumo, como a demanda contratada e sua eventual ultrapassagem. A demanda contratada pela UnB para o período de 2018 a 2025 é de 4000 kW para horários fora de ponta, ou seja, antes das 18 horas e depois das 21 horas. Como pode ser observado na Figura 44, próximo das 15 horas do dia, a demanda média se aproxima do valor contratado, sendo que um aumento na demanda da universidade acarreta na ultrapassagem do valor e no encarecimento da conta de luz.

Os dados utilizados para a elaboração dos gráficos desta seção estão disponíveis no Apêndice C deste trabalho.

## 4.2 RESULTADOS DA ANÁLISE TÉCNICA DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

### 4.2.1 *Modelagem tridimensional do prédio*

A partir das plantas baixas do Instituto Central de Ciências disponibilizadas pelo CEPLAN – UnB, modelamos o referido prédio em 3D no software SketchUp a fim de realizarmos o estudo de sombreamento em seu telhado. Esta modelagem pode ser vista nas figuras abaixo.

Figura 46 - Modelagem tridimensional do Instituto Central de Ciências no software SketchUp

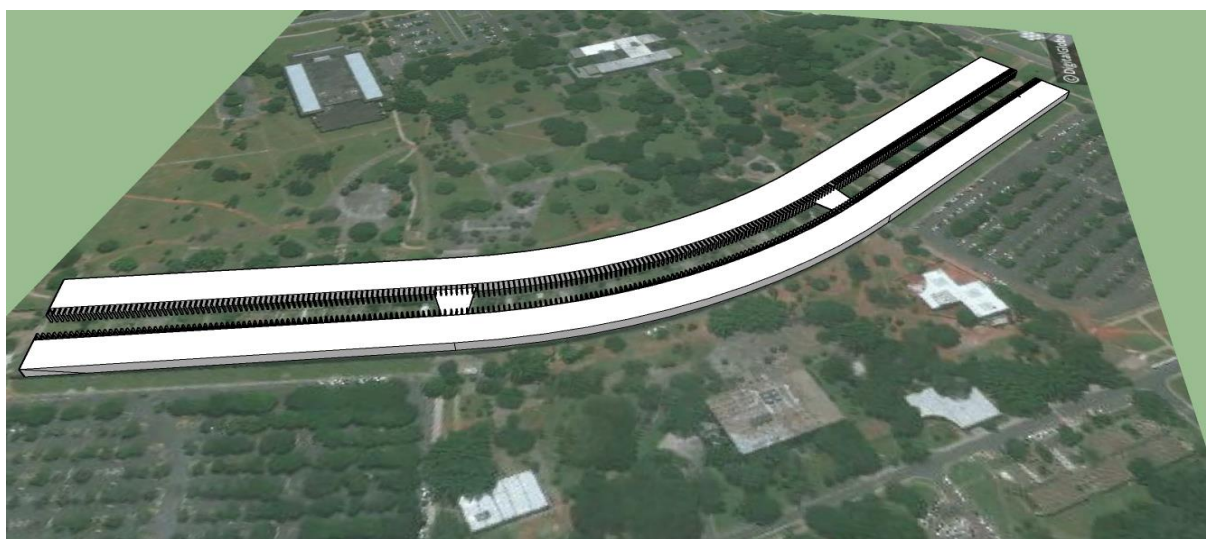
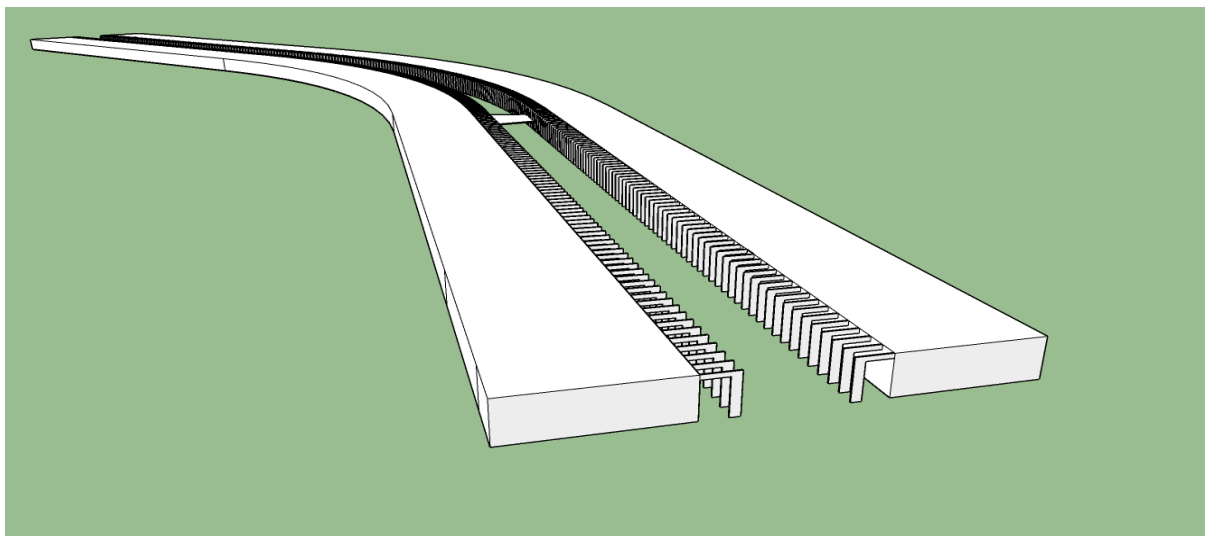




Figura 47 - Vista do ICC norte modelado



Como dito anteriormente, o telhado do referido prédio é plano, condição ideal para a instalação de um sistema fotovoltaico. Os anfiteatros se localizam no bloco B do prédio, à direita na Figura 47.

Para o projeto fotovoltaico, também é necessário que se localize o prédio em relação ao norte geográfico. Com o auxílio do software Google Earth, a direção do prédio em relação ao norte foi obtida e é mostrada na Figura 48.

Figura 48 - Direção do prédio em relação ao norte geográfico



Fonte: Google Maps



Percebe-se que a parte norte do ICC é praticamente voltada para o norte geográfico, com orientação de aproximadamente  $-15^\circ$  em relação ao norte, enquanto a ala sul está orientada em aproximadamente  $-55^\circ$ . Isto afeta diretamente na disposição dos painéis fotovoltaicos, já que idealmente, eles devem ser orientados com ângulo azimutal nulo, ou seja, voltado para o norte.

#### **4.2.2 Estudo de sombreamento**

Para o estudo de sombreamento do Instituto Central de Ciências ser realizado, observações do local foram feitas. Ressalta-se que o sistema fotovoltaico será instalado no telhado de apenas um dos blocos do referido prédio, o bloco B, onde se localizam todos os anfiteatros. Esta escolha foi feita para o sistema ficar mais próximo à carga, diminuindo eventuais quedas de tensão e custos de instalação. Portanto, o estudo de sombreamento foi realizado apenas para este lado do ICC.

Inicialmente, foi observado a presença de 10 árvores que poderiam causar sombras no telhado em análise. Uma dessas árvores é mostrada na Figura 49, sendo ela e todas as outras consideradas neste estudo.

Figura 49 - Árvore presente no ICC Norte.



Além disso, utilizando o software Google Earth, foi possível observar a presença de condensadoras de ar condicionado no telhado do Instituto Central de Ciências. Na Figura 50 é mostrada a presença desses objetos na área citada, sendo que a disposição e a quantidade de condensadoras também foram consideradas.

Ressalta-se que tentativas foram feitas para se realizar uma visita técnica ao telhado do prédio para melhor avaliar o sombreamento no local, porém isto não foi possível.

Figura 50 - Presença de condensadoras de sistemas de ar condicionado no telhado do ICC Norte.



A partir disso, tanto as árvores como as condensadoras do telhado foram inseridas no modelo tridimensional do Instituto Central de Ciências, criado no software SketchUp. As figuras abaixo mostram as árvores e condensadoras inseridas no modelo.

Figura 51 - Condensadoras e árvores inseridas na modelagem tridimensional do ICC.

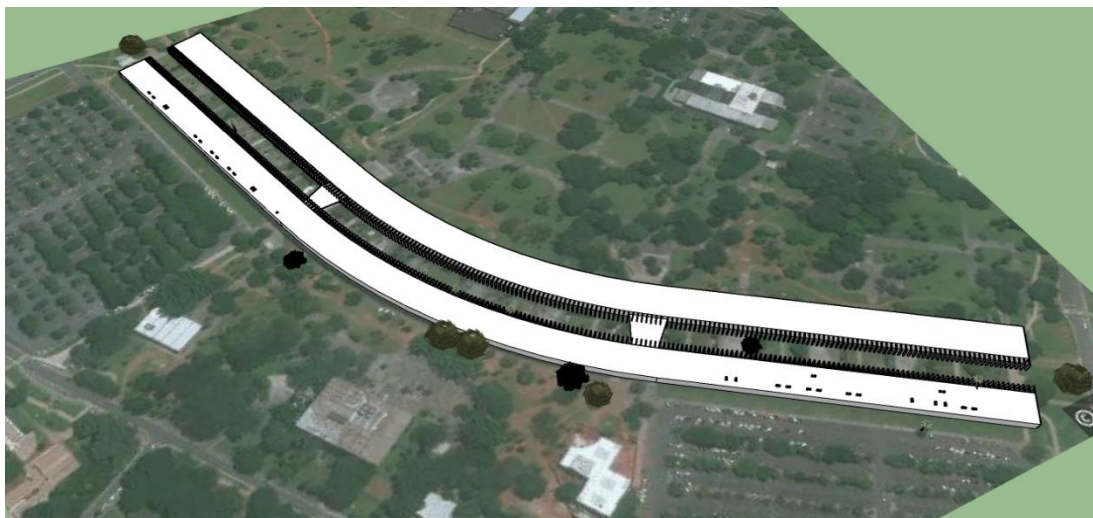


Figura 52 - Presença das condensadoras e árvores inseridas no modelo do ICC Sul

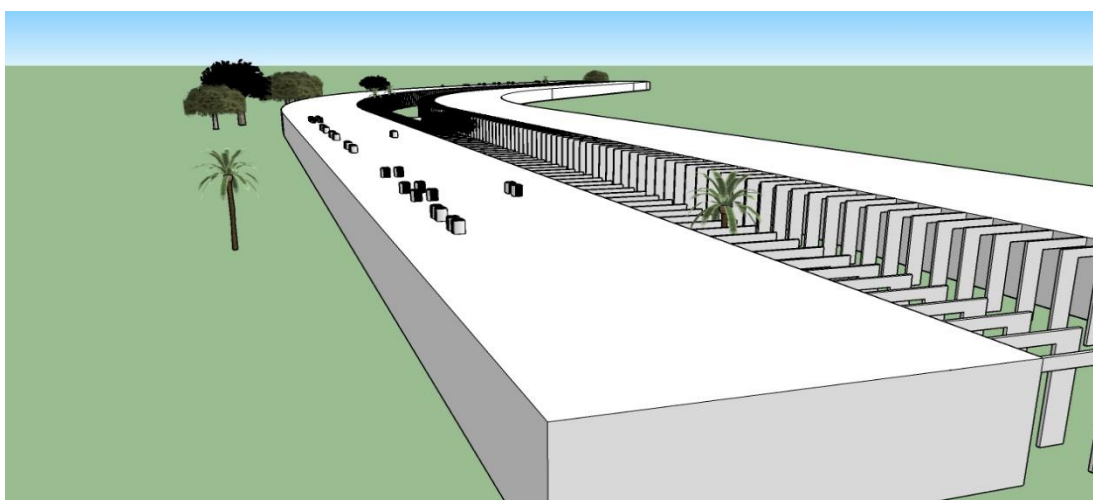
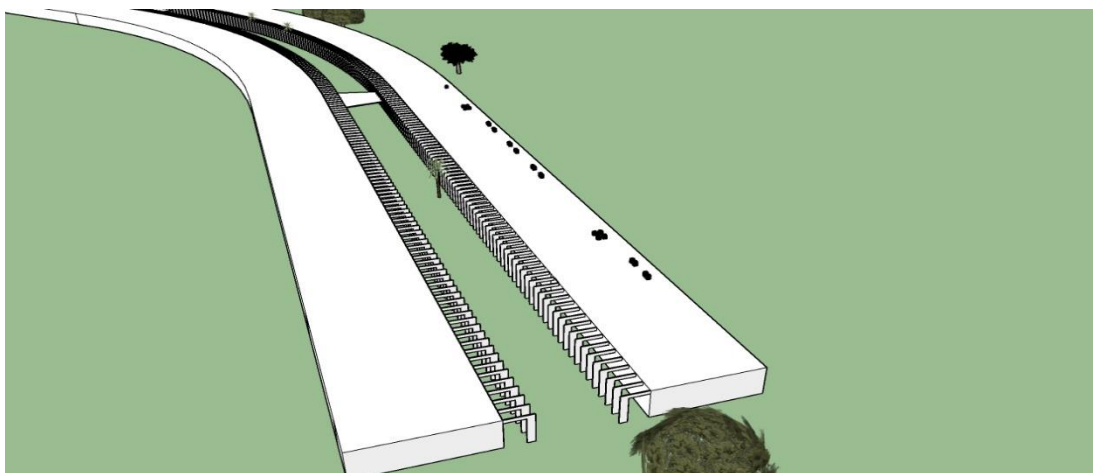


Figura 53 - Presença das condensadoras e árvores inseridas no modelo do ICC Norte.



A partir disto, verifica-se no telhado de interesse onde há sombreamento. As sombras sobre o telhado foram analisadas para dois horários em dois dias do ano: dia 21 de junho, o solstício de inverno, quando o sol está mais ao norte do globo e a irradiância efetiva está mais próxima de seu mínimo no hemisfério sul e dia 21 de dezembro, no solstício de verão, quando o sol está mais ao sul do globo e a irradiância efetiva é mais próxima do seu valor máximo. (CRESESB, 2014). Os horários escolhidos foram os de 9 e 15 horas dos referidos dias.

Para melhor visualização, serão mostrados os sombreamentos que ocorrem no ICC Norte e no ICC Sul. Como o sombreamento que ocorre no solstício de inverno é mais crítico que no solstício de verão, apenas as figuras de simulação de sombreamento para esse dia serão mostradas aqui.

Figura 54 - Sombreamento no ICC Norte no dia 21 de junho (Solstício de inverno).

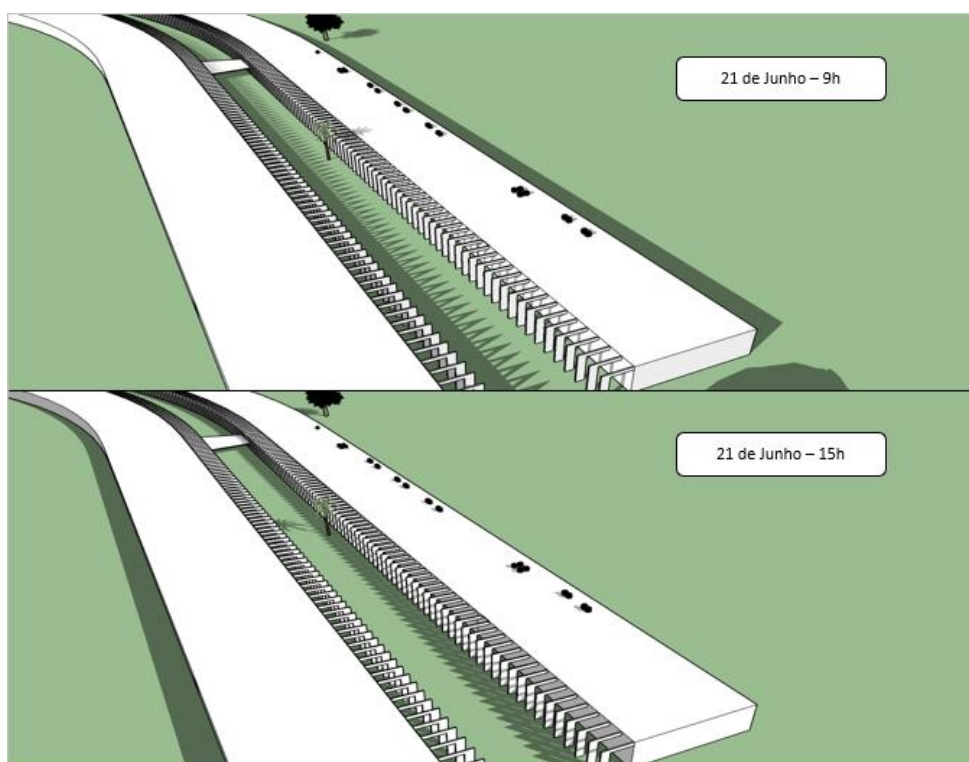
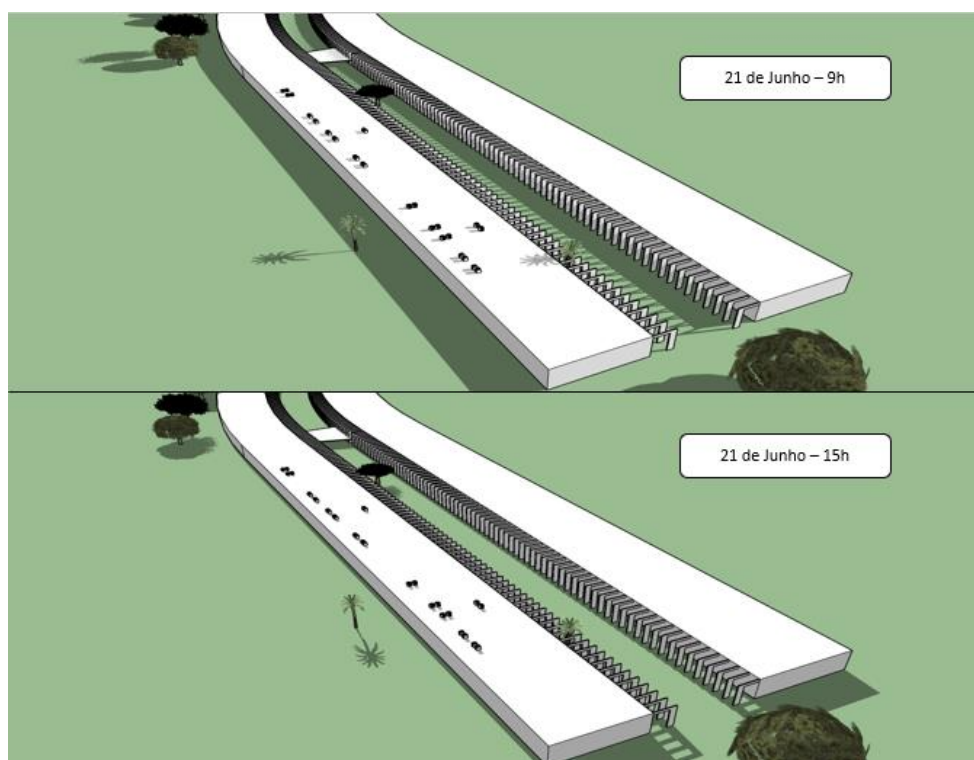




Figura 55 - Sombreamento no ICC Sul no dia 21 de junho (Solstício de inverno)



Além dos sombreamentos simulados nos solstícios de inverno e de verão, para se obter a área disponível no telhado para a instalação do sistema fotovoltaico, deve-se levar em conta também a questão do tombamento do prédio. Para evitar prejuízos às características visuais do Instituto Central de Ciências, propõe-se que o sistema fotovoltaico seja instalado com 5 metros de distância das beiradas do telhado, não alterando, então, a fachada do prédio.

Com estas considerações, a área disponível para a instalação do sistema fotovoltaico foi obtida. As figuras abaixo mostram as áreas desprezadas do bloco em que o sistema será instalado, em vermelho. Elas foram desconsideradas devido ao sombreamento e à preocupação com o tombamento do prédio.

Figura 56 - Áreas desprezadas no bloco B do ICC para a instalação do sistema fotovoltaico.

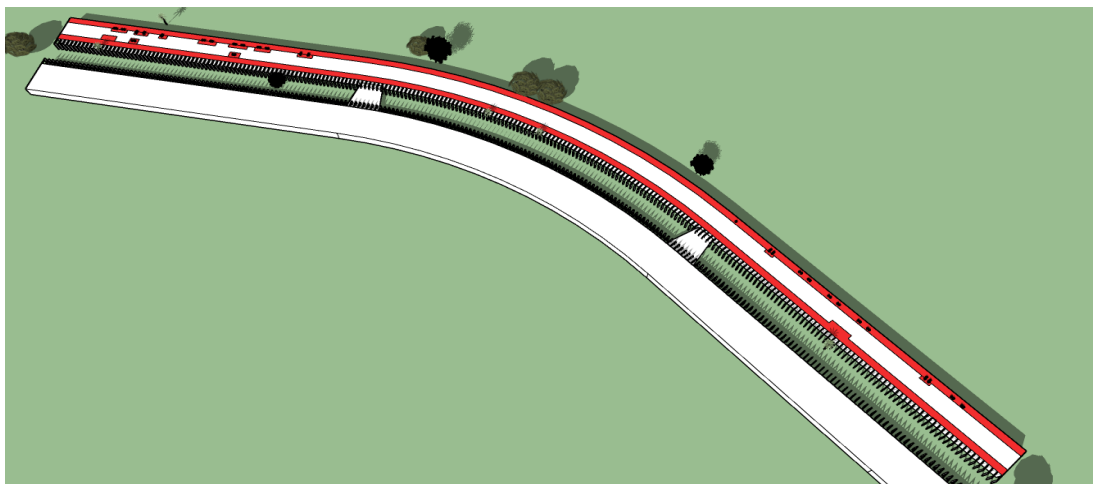


Figura 57 - Áreas desprezadas no bloco B do ICC Norte.

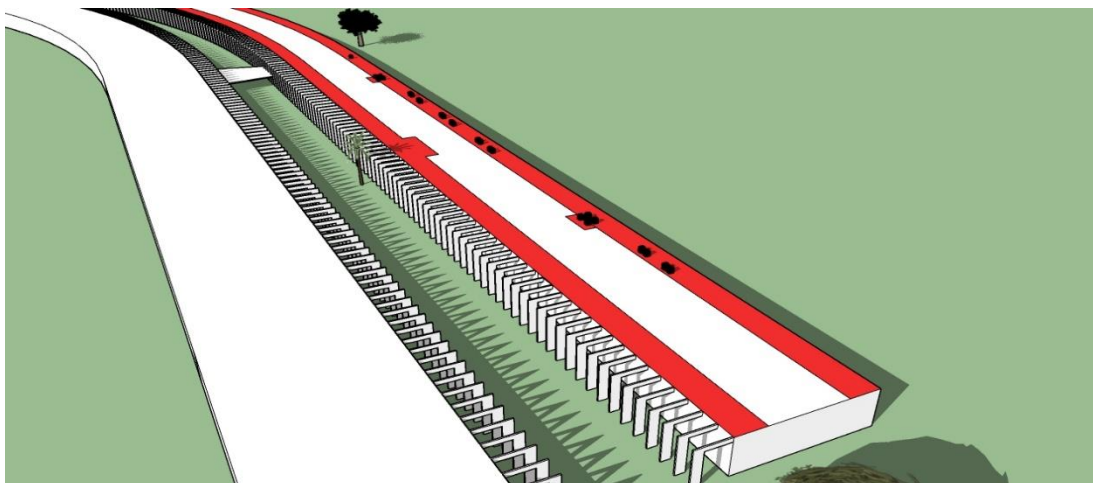
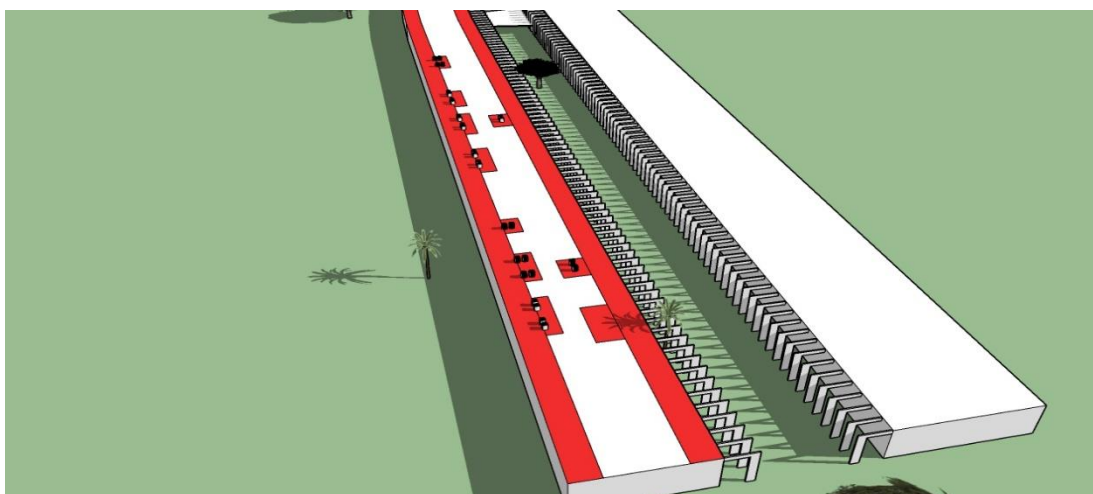


Figura 58 - Áreas desprezadas no bloco B do ICC Sul.



Com isto, considerando as partes norte, sul e central do bloco B do Instituto Central de Ciências, tem-se uma área disponível para a instalação do sistema fotovoltaico de 8838,39 m<sup>2</sup>.

#### **4.2.3 Dimensionamento do sistema**

A partir do valor do consumo de energia anual dos anfiteatros obtido na seção 4.1.6 como sendo 639,05 MWh, utilizamos o software PVsyst para realizar o pré-projeto do sistema fotovoltaico e obter uma estimativa da potência nominal necessária para suprir o referido consumo.

Inicialmente, no software PVsyst, insere-se o mesmo arquivo climático que foi utilizado na simulação termoenergética. Em seguida, coloca-se o valor de 639,04 MWh/ano como quantidade de energia desejada. A inclinação do painel é definida como 23° e o ângulo azimutal como 0°, valores otimizados. O tipo de painel foi definido como do tipo padrão, com células de silício policristalino. O telhado definido como plano e a forma de instalação como ventilada.

Com isto, o software estimou como sendo necessário um sistema com potência nominal de 355 kWp, que ocuparia aproximadamente 2366 m<sup>2</sup>.

Sendo assim, a partir do resultado obtido pode-se escolher a configuração do sistema em relação ao número de inversores. Há a possibilidade de instalar um único inversor para todo o sistema, um inversor central, ou então, dividir o projeto em subsistemas e utilizar vários inversores.

Como dito anteriormente, o uso de um inversor central resulta em um menor investimento inicial e em menores custos de manutenção e operação. Entretanto, nesta topologia, quando há uma falha no inversor, toda a produção de energia é interrompida. Além disso, esta configuração aumenta o problema de proteção contra sobrecorrentes e aqueles derivados de diferentes sombreamentos (FRONTIN et al., 2017).

Já no caso em que há múltiplos inversores, o projeto é dividido em subsistemas, cada um para cada inversor. Nesta configuração, cada subsistema opera em seu ponto de máxima potência, nos casos em que os inversores possuem MPPT, e cada um fornece o diagnóstico de produção para os subsistemas, além de prover proteção contra subcorrentes e sobretensões no lado de corrente contínua. Além disso, esta

topologia limita problemas de acoplamento entre módulos e inversores e a redução no desempenho devido ao sombreamento (FRONTIN et al., 2017).

Desta forma, devido às diversas vantagens técnicas apresentadas, a configuração com múltiplos inversores foi escolhida para o sistema deste trabalho. Como o objetivo do sistema fotovoltaico é suprir o consumo dos 18 anfiteatros presentes no Instituto Central de Ciências, optou-se por dividir os 355 kWp de potência nominal necessária por 18 subsistemas.

Cada inversor será instalado próximo do anfiteatro, sendo conectado diretamente no quadro elétrico de cada um desses ambientes. Além do motivo técnico, de possuir a carga mais próxima o possível da geração, esta configuração possui caráter educacional, mostrando na prática o uso de energias renováveis pela universidade. Ressalta-se que, como os equipamentos são de alta potência, sua presença dentro dos anfiteatros ocasionaria o aumento da carga térmica dos ambientes. Desta forma, sugere-se que a instalação seja feita na antessala dos ambientes, quando existente, ou no lado externo dos anfiteatros, o mais próximo possível do quadro elétrico.

Assim sendo, para atingir uma potência de 355 kWp, o sistema fotovoltaico deveria ser composto por 18 subsistemas idênticos de 20 kWp de potência. Entretanto, para atingir o ponto de operação ótimo do inversor, deve-se levar em consideração um sobredimensionamento de 10% nas placas fotovoltaicas. Desta forma, a potência nominal de cada subsistema será de 22 kWp.

#### ***4.2.4 Escolha dos componentes e simulação da energia gerada***

No software PVsyst, optou-se por realizar o projeto para apenas um dos subsistemas de 22 kWp, já que todos são idênticos. Logo, basta multiplicar os resultados obtidos na simulação realizada pelo número de subsistemas para se encontrar os resultados para todo o projeto.

No software PVsyst, foi inserido o arquivo climático “INMET 2016”, assim como na simulação termoenergética. Em seguida, a inclinação das placas foi definida como 23° e com ângulo azimutal de 0°, baseando-se na curva de otimização fornecida pelo software.

A marca e modelo das placas fotovoltaicas foram escolhidas baseando-se na melhor relação custo-benefício do mercado. Ou seja, no menor valor de Reais por



Watt-pico encontrado, considerando apenas marcas com boa reputação no mercado e modelos com certificações de qualidade. Ressalta-se que, como neste projeto a área disponível para a instalação é bastante extensa, não é necessário utilizar placas fotovoltaicas com as maiores potências do mercado.

Para o inversor, as mesmas considerações foram feitas, sendo escolhido o equipamento com melhor custo-benefício, de uma marca com boa reputação e modelo com certificação de qualidade.

Todos os parâmetros utilizados para realizar a simulação do referido subsistema estão expostos na Tabela 13.

Tabela 13 - Parâmetros utilizados na simulação para um subsistema de 22 kWp.

Parâmetro	Especificação	Motivação
Ângulo Azimutal	0°	Valor otimizado
Inclinação dos módulos	23°	Valor otimizado
Módulo	Canadian CS6K-275P	Melhor relação custo-benefício
Inversor	Fronius Symo 20.0-3-M	Melhor relação custo-benefício
Quantidade de entradas MPPT	2	Especificação do equipamento
Módulos por <i>String</i>	20	Adequação ao inversor
Número de <i>Strings</i>	4	Adequação ao inversor (2 <i>strings</i> por entrada MPPT)
Potência nominal CA	20 kW	Especificação do inversor
Potência nominal CC	22 kWp	Especificação dos módulos

Para cada subsistema, tem-se 1 inversor de 20 kW de potência e 80 módulos fotovoltaicos, divididos em 4 fileiras iguais. Cada par de fileira está em paralelo e conectada a uma entrada MPPT do inversor.

As especificações dos módulos fotovoltaicos e do inversor utilizados são mostrados nas tabelas abaixo.

Tabela 14 - Parâmetros elétricos (em STC) do módulo fotovoltaico utilizado.

<b>Parâmetro</b>	<b>Especificação</b>
Marca	Canadian
Modelo	CS6K-275P
Potência Nominal	275 W
Tensão de máxima potência (Vmp)	31 V
Corrente de máxima potência (Imp)	8,88 A
Tensão de circuito aberto (Voc)	38 V
Corrente de Curto-Circuito (Isc)	9,45 A
Eficiência do módulo	16,8%

Tabela 15 - Parâmetros elétricos nominais do inversor utilizado.

<b>Parâmetro</b>	<b>Especificação</b>
Marca	Fronius
Modelo	Symo 20.0-3-M
Potência Nominal	20 kW
Tensão máxima de entrada	1000 Vcc
Corrente máxima de entrada	27 A
Tensão de saída	154 Vca a 264 Vca
Corrente máxima de saída	31,9 A
Eficiência	98,1%
Número de fases	3

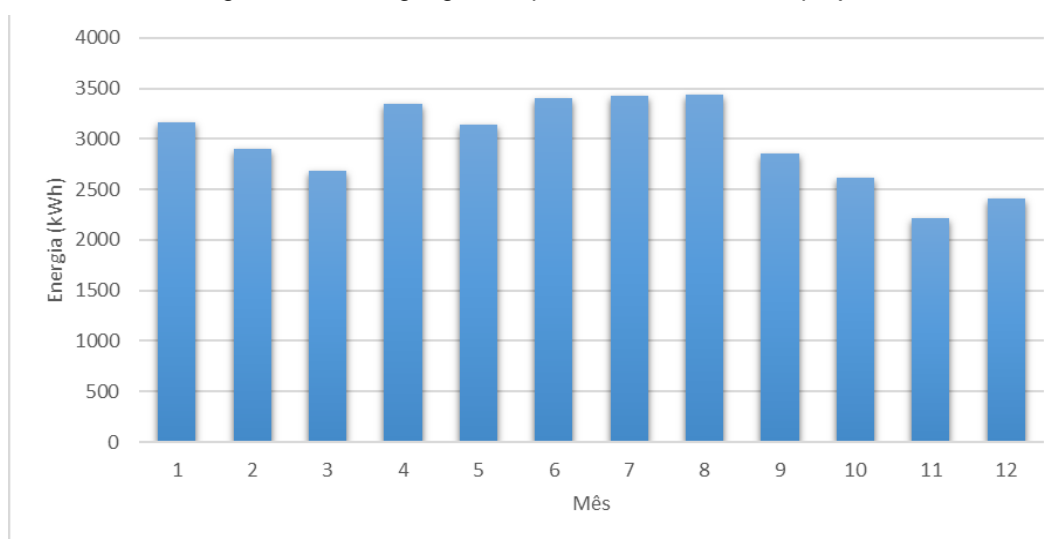
Para as perdas envolvidas no sistema fotovoltaico, os valores inseridos na simulação estão dispostos na Tabela 16.

Tabela 16 - Perdas inseridas na simulação

Perdas	Valor	Motivação
Térmicas	29 W/m <sup>2</sup> .K	Requisito de projeto
Ôhmicas	1,5%	Padrão do software
Qualidade do módulo	0,5%	Padrão do software
LID	2%	Padrão do software
Incompatibilidade	2,5%	Padrão do software
Sujeira	5%	Clima seco, mas orientando limpeza periódica.

Com isto, a simulação realizada no software PVsyst resulta em uma produção anual de energia de 35,59 MWh/ano. A produção de energia por mês, considerando as perdas, é mostrada abaixo.

Figura 59 – Energia gerada por um subsistema do projeto

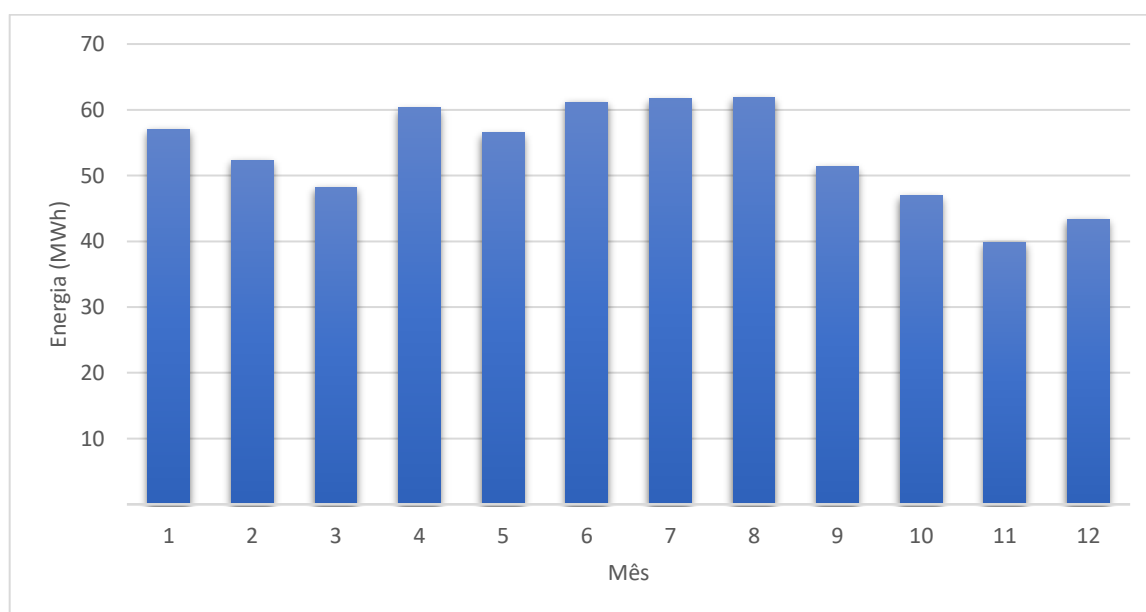


Atribuindo o resultado obtido para os 18 subsistemas do projeto, tem-se que o sistema como um todo produz 640,62 MWh/ano. Os resultados do sistema fotovoltaico projetado são apresentados na Tabela 17 e a energia total gerada mensalmente em seguida.

Tabela 17 - Características do sistema fotovoltaico projetado.

Parâmetro	Subsistema	Sistema fotovoltaico
Potência nominal	22 kWp	396 kWp
Energia gerada	35,59 MWh/ano	640,62 MWh/ano
Área ocupada	131 m <sup>2</sup>	2358 m <sup>2</sup>
Número de painéis	80	1440
Número de inversores	1	18

Figura 60 - Energia gerada pelos 18 subsistemas.



#### 4.2.5 Disposição das placas fotovoltaicas no telhado

A partir da área disponível no telhado do Bloco B do Instituto Central de Ciências obtida no estudo de sombreamento e da quantidade de placas fotovoltaicas e de suas dimensões, mostradas na seção anterior, o estudo da disposição do sistema no telhado do referido prédio foi feito.

Inicialmente, deve-se definir o espaçamento entre as placas de forma a não haver sombreamento entre elas. Segundo VILLALVA (2013), uma regra prática para se obter o espaçamento entre as fileiras de placas é dada pela equação a seguir.

$$D = 3,5 \times z \quad (7)$$

em que

D: Espaçamento entre as fileiras.

z: Altura da haste de fixação das placas.

Logo, como o módulo utilizado possui altura de 1,65 metro e inclinado em 23°, tem-se que a altura da haste necessária é de 0,645m. Sendo assim, o espaçamento necessário entre as fileiras de módulos é de 2,25 metros. Como no telhado temos uma grande área disponível, foi considerado a distância de 2,5 metros, por segurança.

No software SketchUp, a partir do modelo tridimensional construído, os 80 módulos fotovoltaicos de cada subsistema foram inseridos, totalizando 1440 placas. As dimensões, a inclinação dos módulos, o ângulo azimutal e a área disponível para a instalação foram consideradas neste estudo. Com isto, tem-se os resultados mostrados abaixo.

Figura 61 - Disposição das placas no ICC Norte.

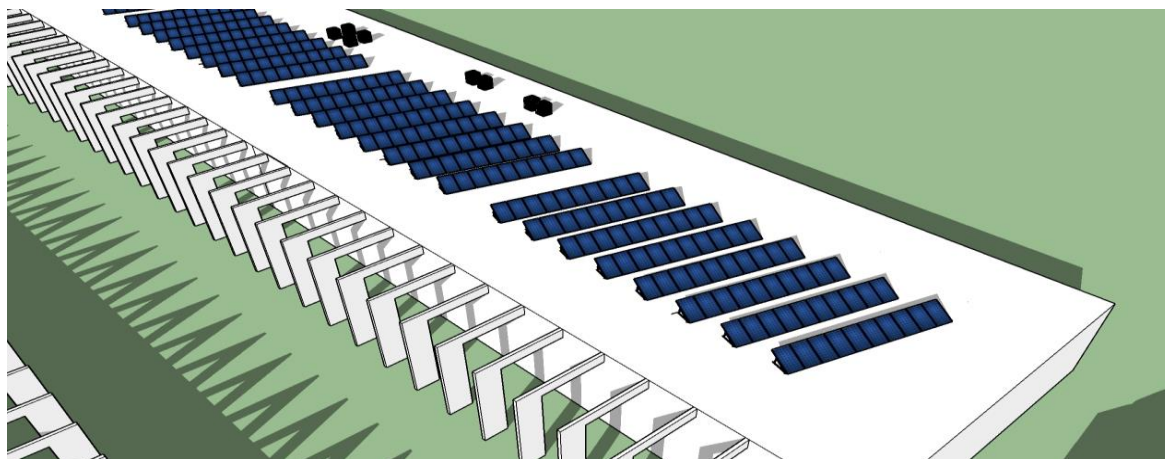


Figura 62 - Detalhe das placas do ICC Norte, onde foi considerado o sombreamento causado pela árvore.

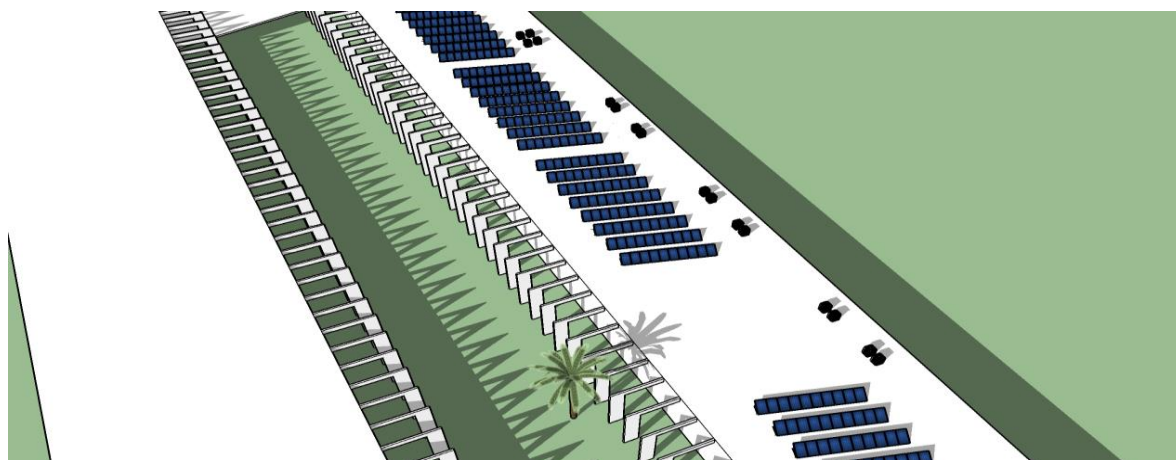


Figura 63 - Todos os 9 subsistemas presentes no ICC Norte

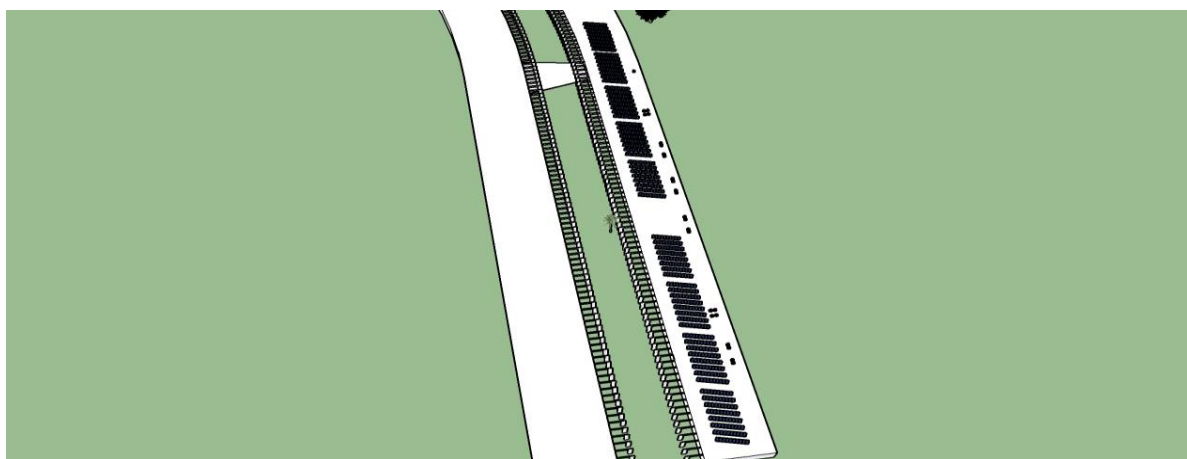


Figura 64 - Disposição das placas fotovoltaicas no telhado do ICC Sul

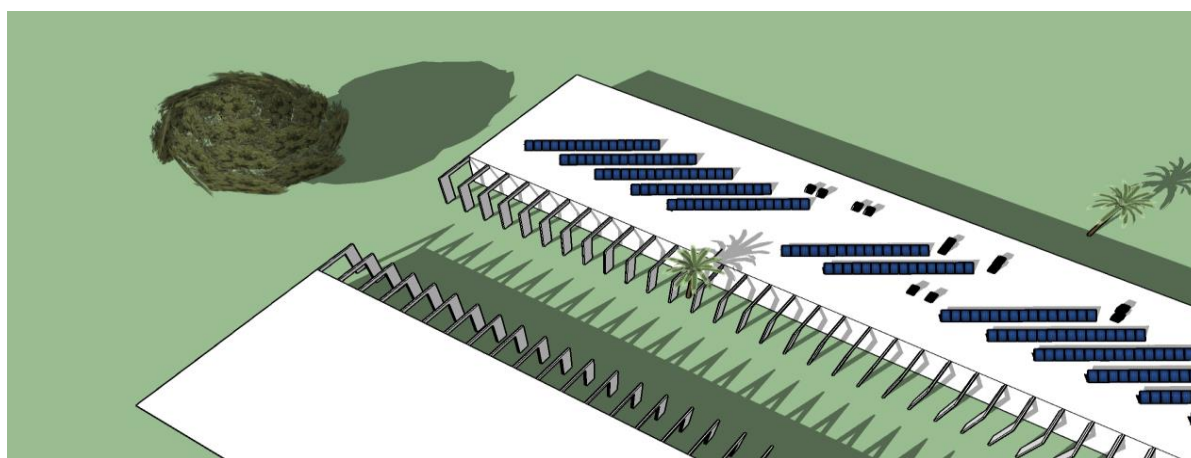
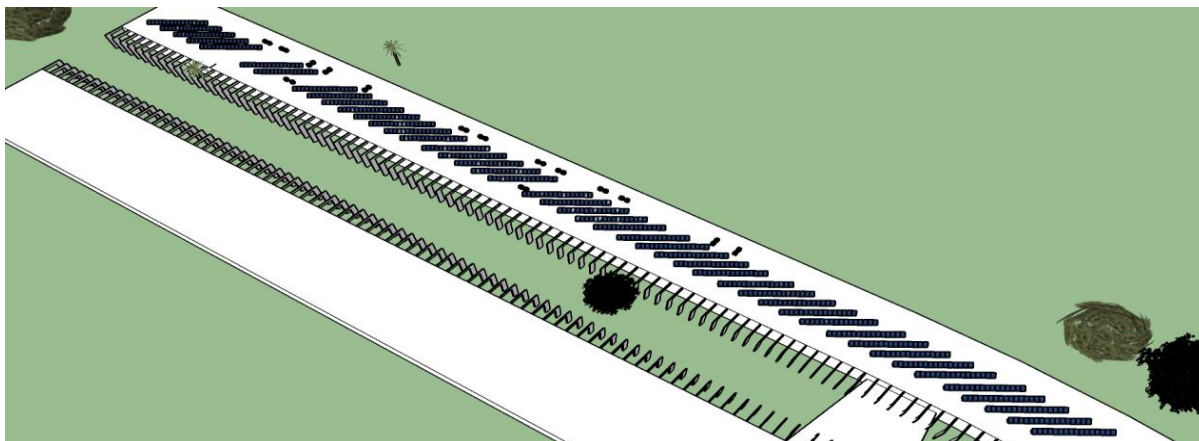


Figura 65 - Disposição de todos os 9 subsistemas fotovoltaicos no ICC Sul

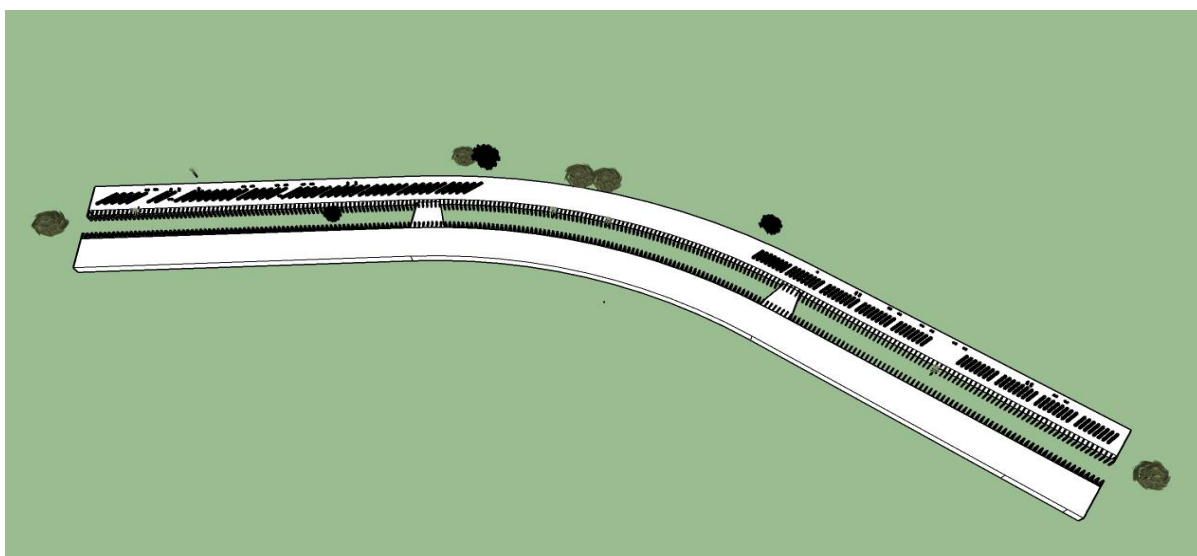


Pelas figuras acima, percebe-se que o telhado do ICC Norte é mais favorável para a orientação do sistema fotovoltaico em relação ao norte geográfico, além de não possuir condensadoras que atrapalhem a disposição das fileiras das placas. Entretanto, a presença de uma árvore bastante próxima ao telhado acarreta na necessidade de haver um maior espaçamento entre os subsistemas.

Já no ICC Sul, deve-se adaptar o espaçamento das fileiras com as condensadoras de ar condicionado presentes nesta área do prédio. Além disso, devido à orientação do ICC Sul, as fileiras dos módulos devem ser mais extensas do que no ICC Norte, já que ambos devem ser orientados para o norte geográfico.

A disposição de todo o sistema é mostrada na Figura 66 a seguir.

Figura 66 - Disposição do sistema fotovoltaico no telhado do Instituto Central de Ciências.



Como pode ser observado, todos os subsistemas serão instalados ou no ICC Sul ou no ICC Norte, sendo distribuídos 9 subsistemas para cada, um por anfiteatro. Desta forma, cada inversor poderá ser instalado ao lado do quadro elétrico de cada anfiteatro, diminuindo a distância para a carga.

Ressalta-se que a instalação dos módulos fotovoltaicos resultaria em um grande peso na estrutura do Instituto Central de Ciências. Desta forma, uma análise estrutural do prédio deve ser realizada antes da implementação do projeto. Como esta análise foge ao escopo do trabalho, ela não será abordada aqui.

A seguir, é apresentado o projeto elétrico do sistema projetado.

#### 4.2.6 Projeto elétrico

O projeto elétrico será realizado para o subsistema de um dos anfiteatros. Como todos os 18 subsistemas são idênticos e instalados nas mesmas condições, os resultados obtidos aqui podem ser aplicados para todo o projeto.

Inicialmente, apresenta-se a disposição do sistema. Serão utilizadas duas *string box* (caixa de junção) no lado de corrente contínua. A primeira será instalada no telhado, contendo os fusíveis de proteção dos módulos fotovoltaicos e os barramentos de paralelismo entre as *strings*, além do disjuntor de proteção do condutor e um DPS específico para corrente contínua. A segunda caixa de junção será instalada no anfiteatro, contendo uma chave seccionadora e outro DPS. Ao lado desta segunda *string box* CC, teremos o inversor de 20 kW e a caixa de junção para corrente alternada, que terá a proteção dos condutores em corrente alternada e um DPS. Desta *string box*, os condutores são conectados no quadro geral do anfiteatro, interligando-se com a rede.

Para melhor visualização, a Figura 67 e a Tabela 18 abaixo mostram a disposição e a localização de cada componente do projeto.

Figura 67 - Disposição dos componentes do subsistema fotovoltaico

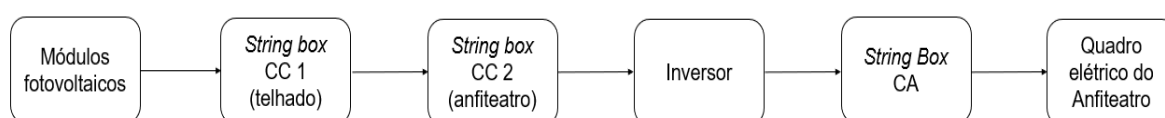




Tabela 18 - Detalhamento das caixas de junção.

<b>Componente</b>	<b>Localização</b>	<b>Equipamentos</b>
<i>String box</i> CC 1	Telhado	Fusíveis, Disjuntor CC e DPS.
<i>String box</i> CC 2	Anfiteatro	Chave seccionadora e DPS.
<i>String box</i> CA	Anfiteatro	Disjuntor CA, DPS.

Utilizando a NBR 5410 e as normas da CEB-D, deve-se dimensionar a seção do condutor utilizado. Para a corrente de projeto, se considera a corrente de curto-circuito de cada *string box* (caixa de junção), já que esta é a máxima corrente que os módulos podem produzir. Mesmo com dispositivos de segurança entre cada string, deve-se prever uma corrente de fluxo reverso, sendo os condutores capazes de suportar esta corrente.

A partir das especificações técnicas do módulo fotovoltaico escolhido, Canadian CS6K-275P, tem-se que a corrente de curto-circuito de cada placa é de 9,45 A, em STC. Ressalta-se que esta corrente é a mesma para a *string*, independentemente do número de painéis em série.

Para cada subsistema de 22 kW, como o inversor Fronius Symo 20.0-3-M possui duas entradas MPPT, podemos dividir os módulos em 4 *strings* de 20 painéis em série, conectando 2 *strings* em paralelo em cada entrada MPPT. Desta forma, para cada entrada do inversor, tem-se uma corrente de projeto de 18,9 A.

Além disso, para o dimensionamento da corrente máxima, deve-se adicionar um fator mínimo de segurança de 25%, assumindo que o painel pode receber uma irradiância de até 1250 W/m<sup>2</sup> (CRESESB, 2014).

Para o lado de corrente contínua, conforme especificado pela norma NBR 16612, os condutores utilizados em sistemas fotovoltaicos devem ser resistentes a altas temperaturas e à influência dos raios UV. Sendo assim, tem-se que a capacidade de condução de corrente destes cabos são normalmente diferentes das capacidades normalmente utilizadas no dimensionamento de condutores em corrente alternada. Desta forma, para o dimensionamento no lado de corrente contínua, os dados da capacidade de condução de corrente de um modelo específico de “cabo solar” foram utilizados.

Na figura abaixo, tem-se as capacidades de condução de corrente do condutor utilizado neste projeto.

Figura 68 - Capacidade de condução de corrente do cabo Prysmian Afumex Solar.

Capacidade de condução de corrente								
Seção mm²	Instalação ao ar livre protegida do sol				Instalação ao ar livre exposta ao sol			
	Modo de instalação <sup>[3]</sup>							
	1	3	1	3	1	3	1	3
	Temperatura de operação no condutor							
	90°C <sup>[4]</sup>		120°C <sup>[5]</sup>		90°C <sup>[4]</sup>		120°C <sup>[5]</sup>	
2,5	35	40	34	38	31	36	29	35
4	47	53	45	51	41	48	39	46
6	60	68	57	65	51	61	49	59
10	83	95	79	90	71	85	68	81
16	110	125	105	120	93	112	89	107
25	146	166	140	159	123	147	117	141
35	181	207	174	198	151	182	145	174
50	229	260	219	249	189	228	181	218
70	285	325	273	311	234	283	224	271
95	343	390	328	374	279	339	267	324
120	402	458	385	438	325	396	311	379
150	463	527	443	504	371	453	355	434
185	528	600	506	574	420	513	402	491
240	633	719	606	688	499	612	477	586

Na Figura 68, o modo de instalação 1 se refere à instalação na qual os dois cabos unipolares (positivo e negativo) são encostados um ao outro na horizontal, enquanto o modo de instalação 3 se refere ao método no qual os cabos unipolares são espaçados entre si em pelo menos 75% do diâmetro externo na horizontal.

Assim, tem-se as informações necessárias para se realizar o dimensionamento dos condutores no lado de corrente contínua do subsistema. A partir das considerações feitas e baseando-se nas capacidades de condução de corrente mostradas, temos resultados abaixo.

Tabela 19 - Dimensionamento do condutor para o lado de corrente contínua.

Método da Capacidade de Corrente						
Corrente de projeto	Correção da corrente	Temperatura ambiente	Tipo de instalação	Método de instalação	S (mm <sup>2</sup> )	Capacidade do condutor (A)
18,9 A	23,625 A	60°C	Instalação ao ar livre exposta ao sol	1	2,5	29

Tabela 20 - Dimensionamento do condutor para o lado de corrente contínua

Método da queda de tensão						
Tensão	Queda de tensão a 120°C (V/A.km)	Distância (m)	Corrente (A)	Queda de tensão (V)	Condutor escolhido (mm <sup>2</sup> )	Capacidade do condutor (A)
620	14,31175	15	18,9	4,06	4mm <sup>2</sup>	39

Analisando as tabelas acima, temos que o condutor escolhido para o lado de corrente contínua deve ser o de 4mm<sup>2</sup>, apresentando queda de tensão de 0,65%. Ressalta-se que a queda de tensão desejável para um sistema fotovoltaico deve ser inferior à 1%, sendo que o condutor de 2,5mm<sup>2</sup> apresenta uma queda de tensão superior a este valor.

Já para o dimensionamento do condutor no lado de corrente alternada, após o inversor, utiliza-se as tabelas de capacidade de condução de corrente da NBR 5410. Para o referido dimensionamento, considera-se uma temperatura ambiente de 55°C, com método de instalação B1 e condutores com isolação EPR ou XLPE. Desta forma, pela tabela 37 da referida norma, tem-se os seguintes resultados:

Tabela 21 - Dimensionamento do condutor para o lado de corrente alternada (após o inversor)

Método da Capacidade de Corrente				
Corrente de projeto	Coeficiente de correção (K)	Corrente de projeto corrigida (Ip')	Condutor escolhido	Capacidade do condutor
31,9 A	0,76	41,97 A	10mm <sup>2</sup>	66 A

Tabela 22 - Dimensionamento do condutor para o lado de corrente alternada (após o inversor)

Método da queda de tensão				
Tensão	$\Delta V$	Distância	Corrente	S (mm <sup>2</sup> )
220 V	2,2 V	5 m	31,9 A	2,17

Com isto, temos que o condutor após o inversor deve ser de 10mm<sup>2</sup>. Ressalta-se que este valor foi obtido para ser possível realizar o dimensionamento do disjuntor, já que para o condutor de 6mm<sup>2</sup>, não foi possível encontrar um valor comercial para disjuntores que atenda às características do projeto.

Para a proteção dos condutores, serão utilizados disjuntores e fusíveis. As instalações de sistemas fotovoltaicos conectados à rede têm duas peculiaridades que são importantes para proteção, que é o fato de as correntes de curto-circuito não serem muito maiores que as correntes nominais e a capacidade de formar e sustentar arco elétrico com correntes não muito superiores a corrente de operação. Desta forma, equipamentos específicos para a proteção deste sistema deverão ser utilizados no lado de corrente contínua.

Sendo assim, os disjuntores CC utilizados devem ser específicos para atuar nesse tipo de corrente, atendendo a norma ABNT NBR IEC 60947-2:2013.

Para os fusíveis, tem-se que eles devem ser do tipo *g*, atendendo a norma IEC 60269-6, já que serão utilizados para sistemas fotovoltaicos.

Os dispositivos disjuntor e fusíveis são dimensionados para suprir duas condições básicas: o dispositivo de proteção não pode atuar em condições de funcionamento normais e este deve atuar antes de degradar o condutor, ou seja,  $I_p < I_n < I_z$ , onde  $I_p$  é corrente de projeto,  $I_n$  a corrente de atuação do disjuntor e  $I_z$  a capacidade de condução de corrente do condutor, levando-se em conta os coeficientes de correção de temperatura e operação. Ressalta-se que para cada *string*, dois fusíveis serão utilizados, um para cada polaridade.

Com estas especificações, a proteção do circuito em corrente contínua foi dimensionada.

Tabela 23 - Dimensionamento do disjuntor em corrente contínua

<b>Disjuntor CC</b>		
<b>Corrente de projeto (Ip)</b>	<b>Capacidade do condutor (Iz)</b>	<b>Valor nominal do disjuntor</b>
18,9 A	39 A	25 A

Tabela 24 - Dimensionamento dos fusíveis para cada string

<b>Fusíveis por string</b>		
<b>Corrente de projeto (Ip)</b>	<b>Capacidade do condutor (Iz)</b>	<b>Valor nominal do fusível (A)</b>
9,45 A	39 A	15 A

Para o lado de corrente alternada do circuito, após o inversor, tem-se que o dimensionamento e a especificação dos disjuntores são de acordo com a norma NBR 5410.

Tabela 25 - Dimensionamento do disjuntor após o inversor

<b>Disjuntor (Corrente alternada)</b>		
<b>Corrente de projeto (Ip)</b>	<b>Capacidade do condutor (Iz)</b>	<b>Valor nominal do disjuntor (In)</b>
31,9 A	39 A	40 A

Além disso, temos a presença de uma chave seccionadora na caixa de junção para corrente contínua presente no anfiteatro. Esta chave foi inserida para, no caso de manutenção no inversor, os módulos fotovoltaicos podem ser desconectados do circuito sem a necessidade de acessar o telhado.

A chave seccionadora deve atender a corrente corrigida do projeto, além da tensão de operação. Este equipamento também deve ser específico para sistemas em corrente contínua, garantindo a não formação de arcos elétricos. Sendo assim, foi escolhida para o projeto a chave seccionadora Schneider C60NA-DC, de 800 Vcc e 32 A, sendo cada uma instalada antes das entradas MPPT do inversor.

Por fim, devemos especificar os dispositivos de proteção contra surtos, o DPS. No Brasil, a necessidade da utilização dos DPS é dada principalmente pelas normas 5410 e 5419, sendo que a norma de desempenho e ensaio vigente para DPS no Brasil é a ABNT NBR IEC 61643-1:2007. Entretanto, ainda não temos uma norma específica de DPS fotovoltaico, que possui necessidades diferentes quanto à segurança. Devido

a isso, buscou-se normas internacionais para o auxílio na especificação desses dispositivos.

A norma internacional a *EN 50539-11, Low-voltage surge protective devices – Surge protective devices for specific application including d.c. – Part 11: Requirements and tests for SPDs in photovoltaic applications*, determina que o DPS específico para sistemas fotovoltaicos deve ser equipado com um dispositivo de proteção especificamente adequado para operar qualquer que seja a corrente produzida pelos módulos fotovoltaicos, podendo ser desconexões embutidas no próprio DPS, seccionadores externos ao DPS coordenados com o comportamento de fim de vida útil do equipamento, ou a combinação dos anteriores.

Esta norma ainda chama a atenção de que o DPS fotovoltaico pode ser danificado por fuga térmica devido a uma quantidade excessiva de atuações em virtude de sobretensões, que mesmo não excedendo suas características conduzam à destruição lenta de seus componentes internos, ou ao dar passagem para terra devido a uma sobretensão que vai além de suas características, levando a uma súbita degradação de sua impedância.

Sendo assim, para o lado de corrente contínua, buscou-se dispositivos de proteção contra surtos específicos para sistemas fotovoltaicos que atendam aos requisitos citados. Além disso, como a distância dos condutores que ligam os módulos fotovoltaicos e o inversor excedem, 10 metros é prudente utilizar um DPS fotovoltaico na saída dos módulos (*String Box CC 1*) e outro na entrada do inversor (*String box CC 2*), sendo este instalado antes da chave seccionadora (FINDER, 2012).

Abaixo, na Tabela 26, são listados os dispositivos especificados.

Tabela 26 - Especificações dos Dispositivos de Proteção contra Surtos.

Local	Classificação	Marca e modelo
Após os painéis (StringBox CC 1)	DPS Classe II para sistemas fotovoltaicos 1000Vcc	Finder 7P.23.9.000.1020
Antes do inversor (StringBox CC 2)	DPS Classe II para sistemas fotovoltaicos 1000Vcc	Finder 7P.23.9.000.1020
Após o inversor (StringBox CA)	DPS Classe 2 trifásico	Finder 7P.25.8.275.1020

Com as considerações feitas, foi realizado o diagrama elétrico do projeto. Na figura abaixo, tem-se a visão geral do projeto, sendo mostrado os seus detalhes em seguida.

Figura 69 - Diagrama elétrico geral do subsistema fotovoltaico.

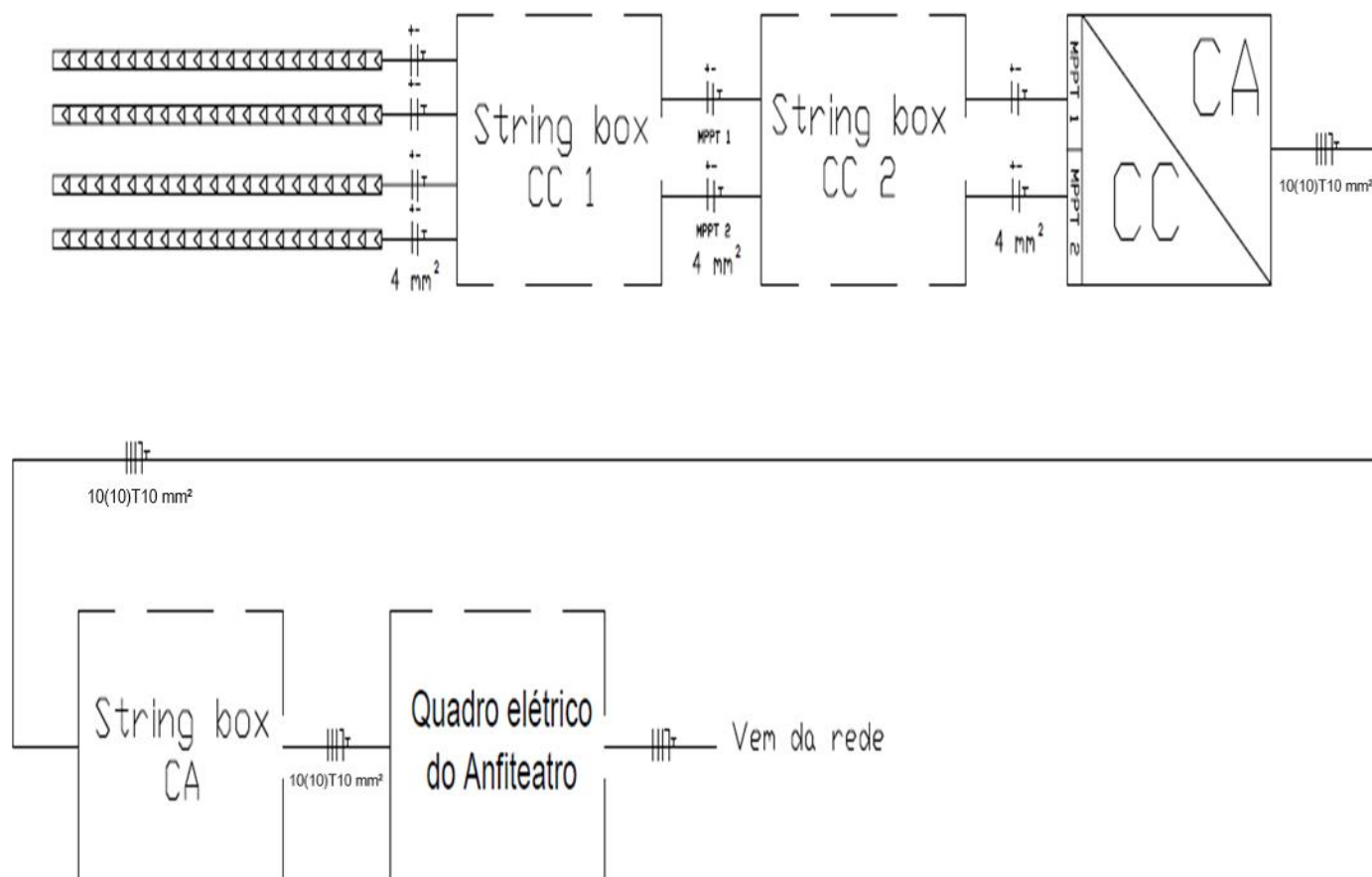


Figura 70 - Detalhamento da String box CC 1

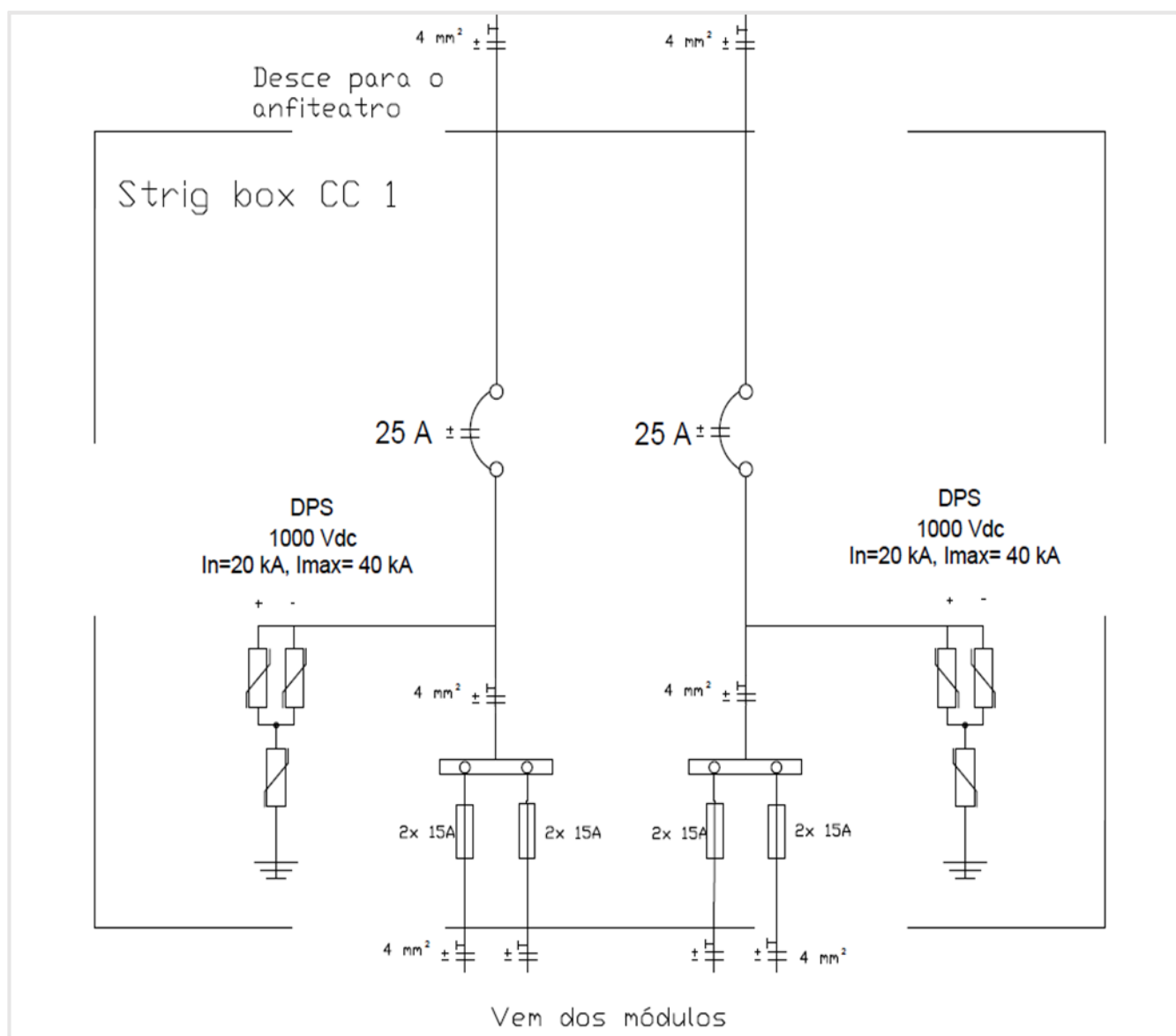




Figura 71 - Detalhamento da String box CC 2 e conexão com o inversor.

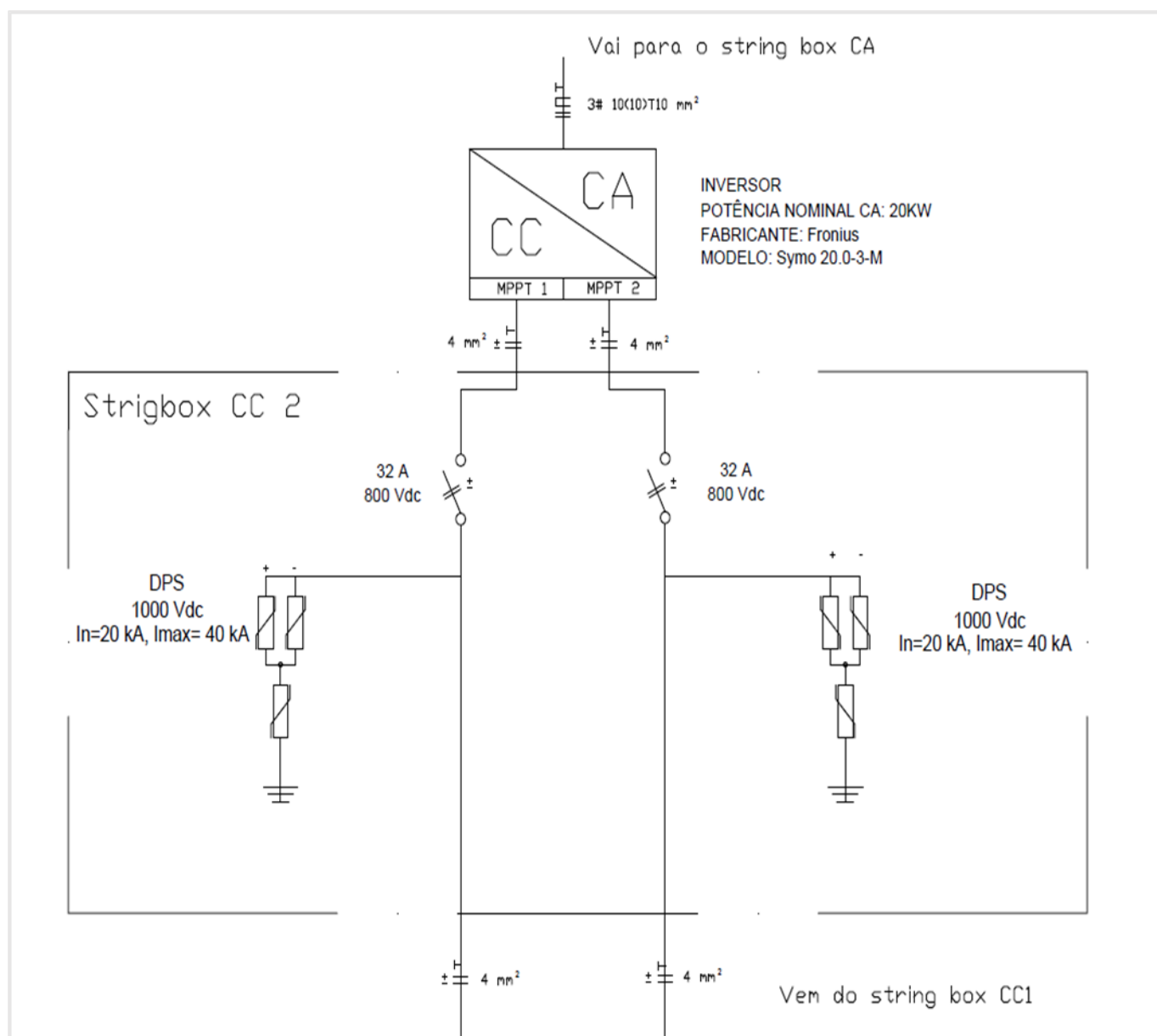
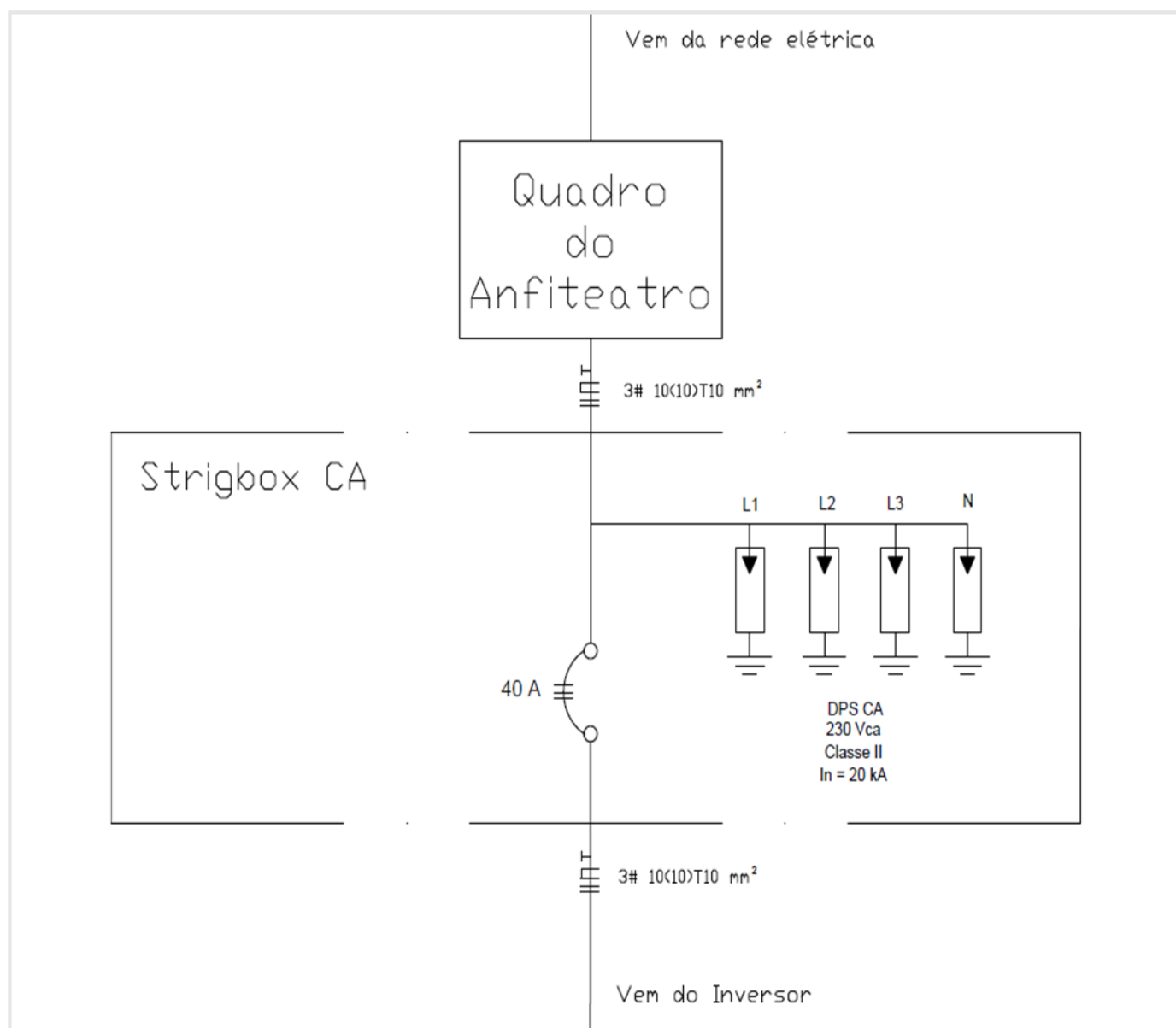


Figura 72 - Detalhamento da String box CA e conexão com a rede



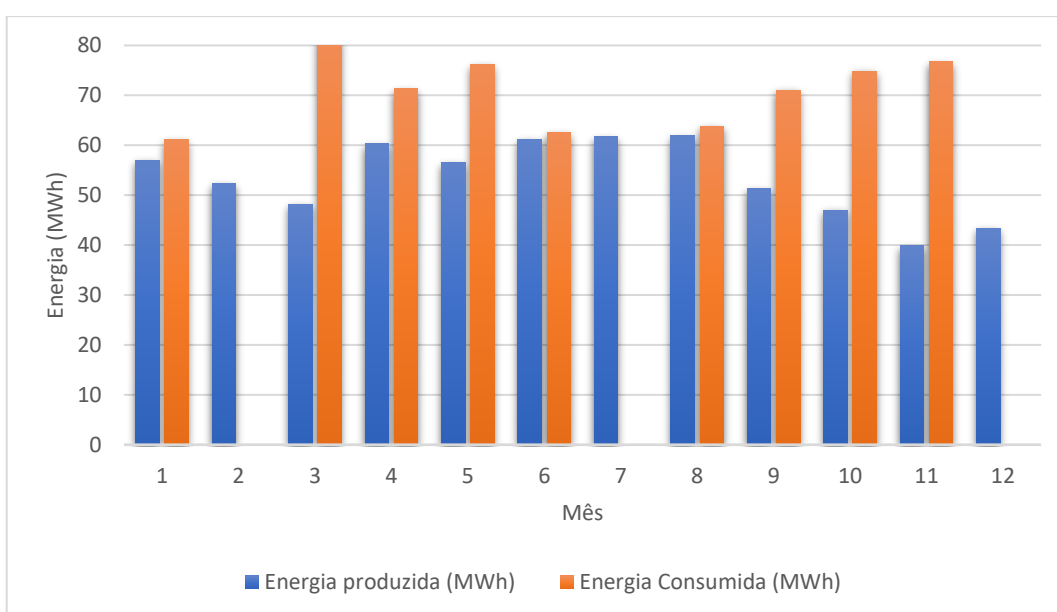
Assim, tem-se o projeto elétrico para o subsistema de 22 kWp. Considerando que todos os subsistemas são idênticos e sob as mesmas condições de projeto, os resultados obtidos podem ser aplicados para os 18 subsistemas existentes. Desta forma, cada subsistema será conectado no quadro elétrico de cada um dos anfiteatros do Instituto Central de Ciências.

#### 4.2.7 Comparação entre a energia gerada pelo sistema fotovoltaico e a consumida pelos anfiteatros

Com os valores do consumo de energia dos anfiteatros ao longo do ano obtidos pela simulação termoenergética, é possível realizar a comparação com os valores de energia produzida pelo sistema fotovoltaico projetado, simulado no software PVsyst.

Para cada mês, os valores de energia consumida pelos anfiteatros e produzida pelo sistema fotovoltaico foram expostos na Figura 73 abaixo.

Figura 73 - Energia mensal consumida pelos anfiteatros e produzida pelo sistema fotovoltaico.

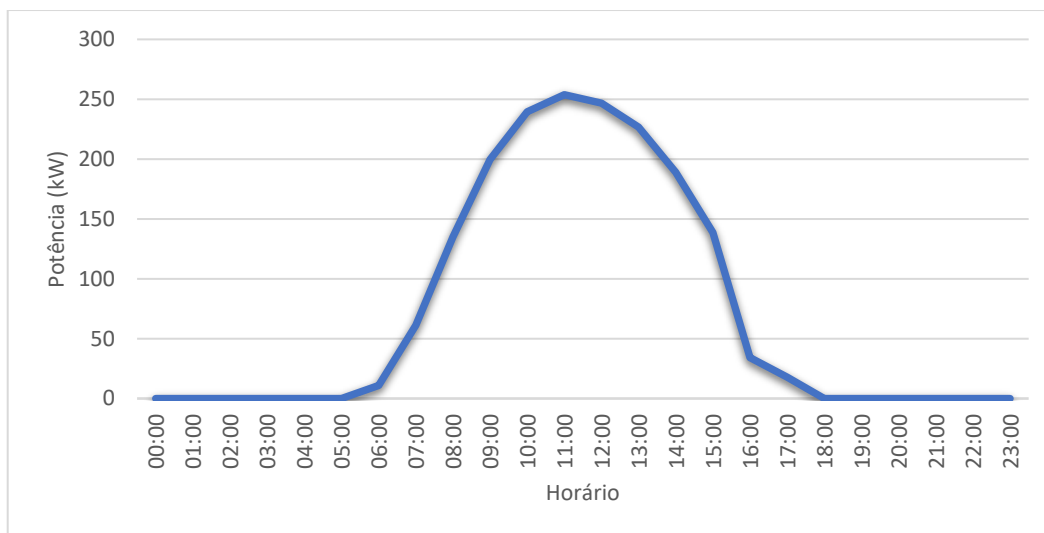


Como estabelecido na metodologia da simulação termoenergética, nos meses de fevereiro, julho e dezembro, é considerado que os anfiteatros não são ocupados e, portanto, não consomem energia. Para os outros meses do ano, é possível observar que o consumo de energia é sempre maior ou igual aos valores de energia produzidos pelo sistema fotovoltaico. Este resultado é motivado pelo fato de que o sistema fotovoltaico foi otimizado para a produção anual de energia.

Em relação a energia anual, os anfiteatros consomem 639,04 MWh, enquanto que o sistema fotovoltaico produz 640,62 MWh. Desta forma, mostra-se que a energia consumida anualmente pelos anfiteatros é totalmente compensada pelo sistema fotovoltaico.

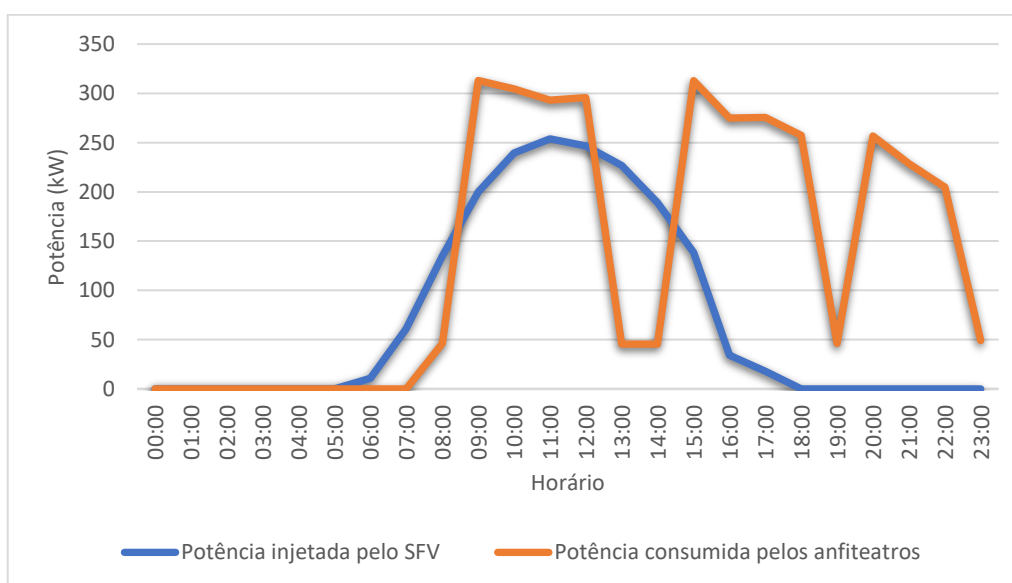
Na Figura 74 abaixo, tem-se a curva de potência média produzida pelo sistema fotovoltaico, obtido através do software PVsyst. Ressalta-se que os valores são para um média anual.

Figura 74 - Potência média produzida pelo sistema fotovoltaico



Comparando a curva obtida na figura acima com o a curva de carga simulada de todos os anfiteatros do ICC, temos o resultado mostrado abaixo.

Figura 75 - Comparação entre a curva de carga dos anfiteatros e a curva de potência gerada pelo sistema fotovoltaico.



Fica claro pela figura acima que o sistema fotovoltaico não é capaz de compensar totalmente a demanda de potência diária dos anfiteatros. Ressalta-se que o maior pico de potência das cargas dos anfiteatros ocorre às 15 horas, enquanto o pico de produção de energia ocorre entre 11 e 12 horas. Isto é resultado do projeto do sistema, que foi otimizado para a máxima produção anual de energia, e não para a redução da demanda. Além disso, observa-se que a curva de carga simulada possui altos valores inclusive durante a noite, diferentemente do sistema fotovoltaico.

Desta forma, percebe-se que apesar do sistema fotovoltaico ser capaz de suprir toda a energia anualmente consumida pelas cargas dos anfiteatros, ele não é capaz de suprir sua demanda, o que era um resultado completamente esperado.

Ressalta-se que o impacto do sistema fotovoltaico na demanda elétrica da universidade não será tratado neste trabalho, sendo este tema sugerido como trabalho futuro.

Com isto, encerra-se a análise técnica do sistema fotovoltaico projetado, sendo a seguir apresentado a análise de sua viabilidade econômica.

## **4.3 RESULTADOS DA ANÁLISE ECONÔMICA**

### **4.3.1 Orçamento**

A primeira etapa da análise econômica é a realização do orçamento, onde serão obtidos os custos do investimento inicial do sistema (Capex) e os custos de operação e manutenção. Como dito anteriormente, devido à dificuldade em se obter os valores de projetos e de outros componentes, se optou por utilizar os resultados do Instituto Ideal (2018), mostrado na Figura 13. Com isto, tem-se que o custo dos módulos fotovoltaicos e dos inversores para o projeto, somados, devem representar 59% do custo Capex.

Para levantar o preço dos módulos fotovoltaicos e dos inversores, foi feita uma pesquisa na internet em sites de venda e distribuidoras de equipamentos para sistemas fotovoltaicos. Como uma análise de sensibilidade do projeto também será realizada, não é primordial que se faça uma média dos valores encontrados. Logo, utilizou-se neste trabalho os preços encontrados em uma das maiores lojas especializadas em energia fotovoltaica do Brasil, que reflete bem os preços praticados pelo mercado.

Sendo assim, os custos de investimento foram obtidos para todo o projeto. Ressalta-se que todos os valores aqui encontrados foram obtidos em setembro de 2018, assim como toda a análise econômica.

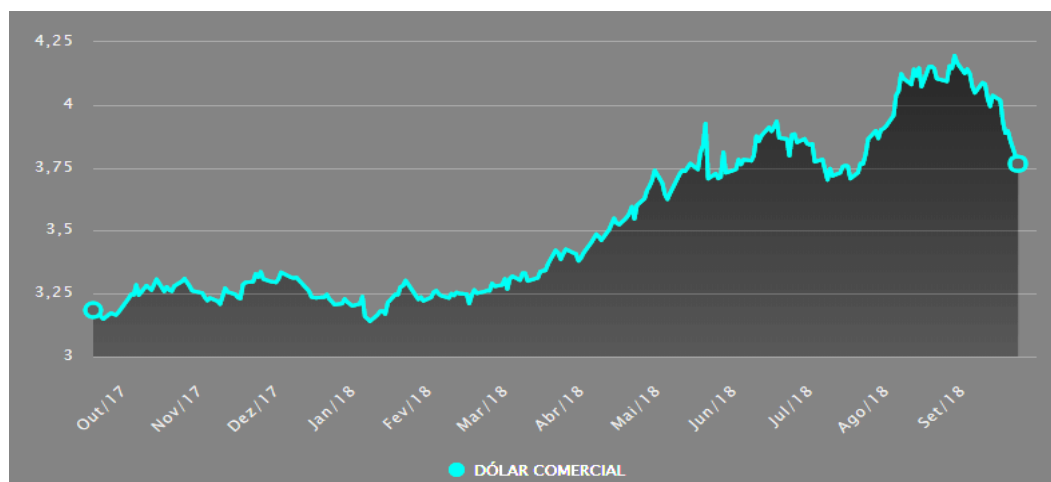
Tabela 27 - Custos de investimento para o projeto (Capex).

<b>Equipamento</b>	<b>Valor unitário</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Valor total</b>	<b>% do Valor final</b>	<b>Fonte</b>
Módulo FV Canadian CS6K-275P	R\$ 515,20	1440	R\$ 741.888,00	38%	Minha Casa Solar
Inversor Fronius Symo 20.0-3-M	R\$ 23.129,00	18	R\$ 416.322,00	21%	Minha Casa Solar
Estrutura	-	-	R\$ 196.306,78	10%	Instituto Ideal
Projeto e instalação	-	-	R\$ 274.829,49	14%	Instituto Ideal
Outros componentes	-	-	R\$ 137.414,75	7%	Instituto Ideal
Custos e despesas administrativas	-	-	R\$ 196.306,78	10%	Instituto Ideal

Logo, temos que o custo total do investimento inicial (Capex) é uma quantia de R\$ 1.963.067,80. Ou seja, 4,96 R\$/Wp. Quando se compara este valor com a média de preço para instalações nesta faixa de potência mostrado na Figura 14, temos que o valor encontrado é ligeiramente superior à média. O valor encontrado pelo Instituto Ideal para sistemas fotovoltaicos acima dos 100 kWp de potência é de 4,60 R\$/Wp, um valor 7,77% inferior ao encontrado neste trabalho.

Esta diferença pode ter sido causada pela alta do dólar que ocorreu no ano de 2018, como pode ser visto na Figura 76. Como o estudo do Instituto Ideal se refere à média de preços do ano de 2017 e a busca de preços deste trabalho ocorreu em setembro de 2018, considerando que os equipamentos utilizados no projeto são importados e, portanto, sujeitos à variação da moeda americana, temos que o maior valor encontrado é justificável.

Figura 76 - Valor do dólar comercial em relação ao Real entre outubro de 2017 e outubro de 2018.



FONTE: <https://economia.uol.com.br/cotacoes/cambio/>. Acesso em: 30 de setembro de 2018.

Para o custo de operação e manutenção anual, conforme explicado no capítulo 3, será considerado como sendo 1% do custo de investimento.

Tabela 28 - Custo de operação e manutenção (Opex)

OPEX	% DO CAPEX	R\$
Anual	1%	R\$ 19.630,68

#### 4.3.2 Valor anual economizado

Primeiramente, para obtermos o valor anual economizado em decorrência da instalação do sistema fotovoltaico, devemos obter as tarifas de energia cobradas pela concessionária.

Em setembro de 2018, a tarifa de energia cobrada pela CEB para unidades consumidoras do grupo A4 é mostrada na Tabela 29 abaixo. Ressalta-se que em setembro de 2018 a bandeira tarifária era a vermelha patamar 2, que resulta em um acréscimo de R\$ 0,05 na tarifa do consumo.

Tabela 29 - Tarifas THS da CEB para unidades consumidoras do grupo A4

Demanda – R\$/kW				Consumo – R\$/kWh	
Ponta	Fora de ponta	Ultrapassagem. na ponta	Ultrapassagem fora de ponta	Ponta	Fora de ponta
30,6798	12,1695	61,3595	24,3389	0,7720	0,5598

FONTE: <http://www.ceb.com.br/index.php/component/phocadownload/category/27-tarifas>. Acesso em 30 de setembro de 2018.

Considerando a bandeira tarifária Verde para a operação, ou seja, um valor de tarifa de 0,5098 R\$/kWh nos períodos fora de ponta e de 0,7220 R\$/kWh nos períodos de ponta, e que a energia produzida pelo sistema fotovoltaico é de 640,62 MWh por ano, conforme obtido na seção 4.2.4, como o sistema fotovoltaico não produz quantidades significativas de energia a partir das 18 horas do dia, horário em que começa a valer a tarifa de ponta, temos que o sistema fotovoltaico é capaz de economizar cerca de R\$ 326.567,19 nas contas de energia da Universidade de Brasília, considerando o primeiro ano de operação.

Como o impacto do sistema fotovoltaico na demanda elétrica da universidade não foi abordado neste trabalho, as receitas provenientes de uma eventual redução de demanda não foram consideradas.

#### **4.3.3 Formação do fluxo de caixa**

A formação do fluxo de caixa foi realizada a partir das receitas e despesas anuais durante o período de tempo de vida do projeto, calculado nas seções anteriores. Além disso, deve-se definir os parâmetros de análise e os fatores específicos que irão afetar os resultados econômicos do investimento.

Inicialmente, tem-se que o tempo de vida útil do projeto foi definido a partir da vida útil dos módulos fotovoltaicos, ou seja, 25 anos. Para os inversores a vida útil foi considerada como sendo de 10 anos, sendo necessário levar em conta a troca deste equipamento. Neste trabalho, considera-se o valor residual do projeto ao fim de sua vida útil igual a zero.

Além disso, como a Universidade de Brasília é uma instituição pública federal, pode-se considerar que não serão necessários recursos provenientes de financiamentos bancários, sendo todo o investimento realizado por meio de recursos próprios.



Conforme exposto na seção 3.3.3, os módulos fotovoltaicos apresentam uma redução gradativa em sua eficiência ao longo de sua vida útil, resultando em uma quantidade gerada de energia decrescente ao longo dos anos. Neste trabalho, será adotada a taxa de 0,75% a.a, conforme estudo realizado por ABINEE (2012).

A Taxa Mínima de Atratividade (TMA) será baseada na Taxa de Longo Prazo (TLP) do BNDES, conforme explicado na seção 3.3.4. A taxa adotada é de 6,87%, valor referente para a TLP de setembro de 2018. Como uma análise de sensibilidade será realizada, julgou-se desnecessário realizar uma média de valores para este parâmetro.

Destaca-se que não foi adotada no fluxo de caixa a taxa de inflação, de modo que, como ela atua sobre todos os valores do fluxo de caixa que se distribuem ao longo do tempo, extingui-la não influencia na análise econômica.

Conforme mostrado por Duarte (2016), o reajuste tarifário da distribuidora de energia de Brasília nunca superou o IPCA, que normalmente é o índice que se utiliza para medir a inflação, ou o IGP-M. Tal conclusão leva a adotar o reajuste tarifário anual como sendo nulo no fluxo de caixa, ou seja, considera-se que a tarifa de energia é de valor constante ao longo dos 25 anos

A Tabela 30 a seguir resume todos os parâmetros definidos para a elaboração do fluxo de caixa do projeto. Ressalta-se que os acréscimos causados por bandeiras tarifárias foram desconsiderados neste estudo.

Tabela 30 - Dados utilizados para a elaboração do fluxo de caixa do projeto

<b>Dados referentes às despesas</b>	
Investimento inicial (Capex)	R\$ 1.963.067,80
Custo do Watt-pico	4,96 R\$/Wp
Custo de operação e manutenção (Opex)	R\$19.630,68
Custo da troca dos inversores	R\$416.322,00
<b>Dados referentes às receitas</b>	
Energia gerada no ano 1	640,62 MWh
Tarifa do consumo	0,5098 R\$/kWh
Economia referente ao consumo no ano 1	R\$ 326.567,19
Taxa de degradação dos painéis	0,75% a.a
<b>Parâmetros para cálculo dos indicadores</b>	
Taxa Mínima de Atratividade (TMA)	6,87%
Vida útil do projeto	25 anos
Vida útil do inversor	10 anos
Reajuste da tarifa em relação à inflação	0% a.a

Com estes dados, elabora-se o fluxo de caixa do projeto, mostrado na Tabela 31.

Tabela 31 - Fluxo de caixa do projeto.

Ano	Investimento Inicial	Economia anual	Custos O&M	Troca de Inversor	Fluxo de caixa	Valor presente	Valor presente líquido
0	-R\$1.963.067,80				-R\$1.963.067,80	-R\$1.963.067,80	-R\$1.963.067,80
1		R\$326.567,19	-R\$19.630,68		R\$306.936,51	R\$287.205,50	-R\$1.675.862,30
2		R\$324.117,94	-R\$19.630,68		R\$304.487,26	R\$266.598,38	-R\$1.409.263,92
3		R\$321.687,05	-R\$19.630,68		R\$302.056,38	R\$247.468,87	-R\$1.161.795,05
4		R\$319.274,40	-R\$19.630,68		R\$299.643,72	R\$229.711,08	-R\$932.083,97
5		R\$316.879,84	-R\$19.630,68		R\$297.249,16	R\$213.226,70	-R\$718.857,26
6		R\$314.503,24	-R\$19.630,68		R\$294.872,57	R\$197.924,48	-R\$520.932,78
7		R\$312.144,47	-R\$19.630,68		R\$292.513,79	R\$183.719,68	-R\$337.213,10
8		R\$309.803,39	-R\$19.630,68		R\$290.172,71	R\$170.533,65	-R\$166.679,45
9		R\$307.479,86	-R\$19.630,68		R\$287.849,18	R\$158.293,37	-R\$8.386,09
10		R\$305.173,76	-R\$19.630,68		R\$285.543,08	R\$146.931,04	R\$138.544,95
11		R\$302.884,96	-R\$19.630,68	-R\$416.322,00	-R\$133.067,72	-R\$64.070,60	R\$74.474,35
12		R\$300.613,32	-R\$19.630,68		R\$280.982,64	R\$126.593,03	R\$201.067,38
13		R\$298.358,72	-R\$19.630,68		R\$278.728,04	R\$117.504,67	R\$318.572,05
14		R\$296.121,03	-R\$19.630,68		R\$276.490,35	R\$109.068,33	R\$427.640,38
15		R\$293.900,12	-R\$19.630,68		R\$274.269,44	R\$101.237,24	R\$528.877,62
16		R\$291.695,87	-R\$19.630,68		R\$272.065,19	R\$93.968,01	R\$622.845,63
17		R\$289.508,15	-R\$19.630,68		R\$269.877,48	R\$87.220,36	R\$710.065,99
18		R\$287.336,84	-R\$19.630,68		R\$267.706,16	R\$80.956,89	R\$791.022,88
19		R\$285.181,82	-R\$19.630,68		R\$265.551,14	R\$75.142,87	R\$866.165,75
20		R\$283.042,95	-R\$19.630,68		R\$263.412,27	R\$69.746,08	R\$935.911,83
21		R\$280.920,13	-R\$19.630,68	-R\$416.322,00	-R\$155.032,55	-R\$38.410,58	R\$897.501,25
22		R\$278.813,23	-R\$19.630,68		R\$259.182,55	R\$60.086,64	R\$957.587,89
23		R\$276.722,13	-R\$19.630,68		R\$257.091,45	R\$55.770,43	R\$1.013.358,33
24		R\$274.646,71	-R\$19.630,68		R\$255.016,04	R\$51.764,03	R\$1.065.122,35
25		R\$272.586,86	-R\$19.630,68		R\$252.956,19	R\$48.045,21	R\$1.113.167,56

#### 4.3.4 Análise do investimento

O valor presente líquido calculado apresenta um lucro de R\$1.113.167,56 ao final da vida útil do projeto, o que significa um Retorno de investimento de 56,71%.

Observando o *payback* descontado, tem-se que após 9,06 anos o valor investido é recuperado, o que mostra que se tem um retorno em médio prazo, mostrando o amadurecimento da tecnologia e a competitividade desta forma alternativa de geração.

Utilizando a série de valores exposta no fluxo de caixa e a fórmula presente no Excel para a Taxa Interna de Retorno, temos uma TIR de 13,30%. Este valor é

superior à TMA utilizada (6,87%), sendo assim outro indicador favorável à implantação do projeto.

Por fim, podemos transformar as despesas ao longo da vida útil do sistema em uma série uniforme equivalente, tem-se um CAE de R\$198.243,07. Desta forma, dividindo este valor pela energia anual gerada, temos como obter o custo da energia fotovoltaica. Este valor é de 0,309 R\$/kWh no ano 1, mostrando que a energia gerada pelo sistema fotovoltaico é muito mais barata que a energia da rede.

Desta forma, analisando todos os indicadores aqui expostos, conclui-se que o investimento é completamente viável economicamente e altamente interessante para a Universidade.

A Tabela 32 a seguir, resume todos os resultados obtidos para os indicadores analisados.

Tabela 32 - Resultados dos indicadores analisados

<b>Indicador</b>	<b>Valor</b>
Payback descontado	9,06 anos
Valor presente Líquido (VPL)	R\$1.113.167,56
Taxa Interna de Retorno (TIR)	13,30%
Retorno do Investimento (ROI)	56,71%
Custo Anual Equivalente (CAE)	R\$198.243,07
Custo da energia fotovoltaica	0,309 R\$/kWh

#### **4.3.5 Análise de sensibilidade**

Os parâmetros adotados para a análise de viabilidade econômica estão sujeitos a variações ao longo dos anos. Sendo assim, é necessário verificar os impactos causados por estas mudanças no projeto em análise. Desta forma, torna-se necessário realizar uma análise de sensibilidade do projeto.

Neste estudo, foram consideradas variações no valor do investimento inicial, na Taxa Mínima de Atratividade, na degradação dos módulos e no reajuste das tarifas de energia em relação à inflação. Para cada variação, analisa-se a Taxa Interna de Retorno, o *Payback* descontado e o Valor Presente Líquido.

#### 4.3.5.1 Variação do Investimento Inicial

Sabe-se que os preços dos componentes do sistema fotovoltaico podem ser alterados facilmente, sendo que isto interfere substancialmente na viabilidade econômica do projeto. Como a maioria dos equipamentos de sistemas fotovoltaicos é importada, muitos dos componentes do projeto estão sujeitos a variações da taxa cambial, além dos fatores comerciais e fiscais. Desta forma, torna-se necessário compreender o quão sensível é o projeto realizado em relação ao investimento inicial.

Com isso, se varia o investimento inicial do empreendimento de 1 R\$/Wp (R\$396.000,00) até 10 R\$/Wp (R\$3.960.000,00) e observa-se os resultados obtidos.

Figura 77 - Sensibilidade da TIR com relação ao investimento inicial.

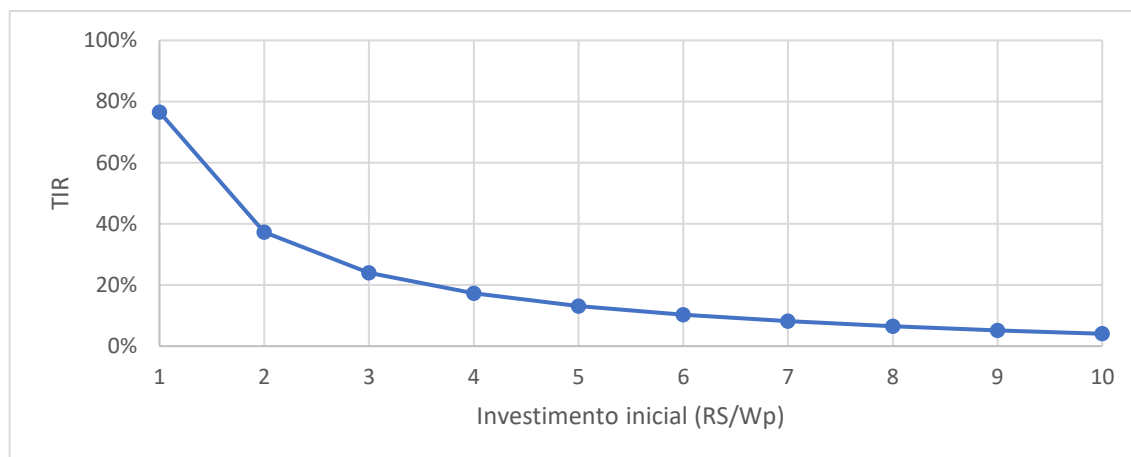


Figura 78 - Sensibilidade do Payback com relação ao investimento inicial.

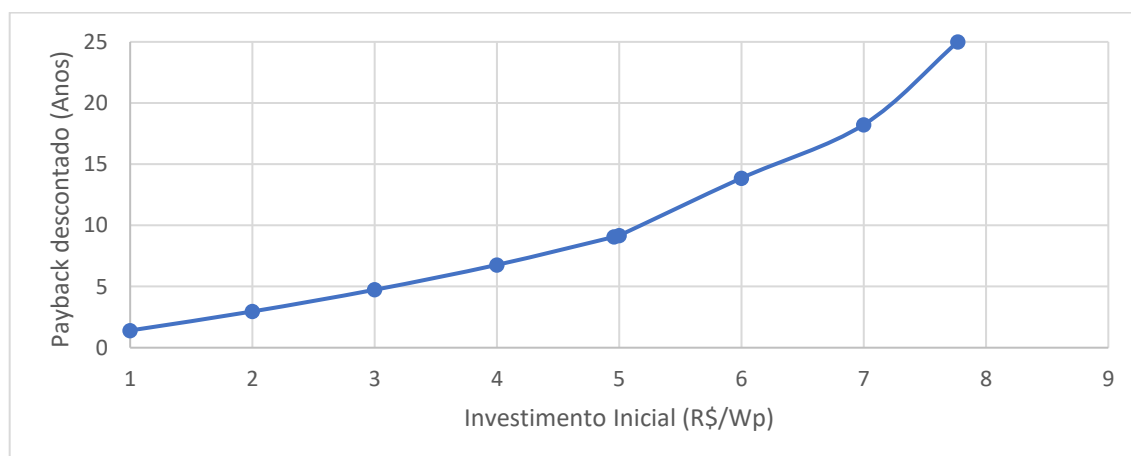
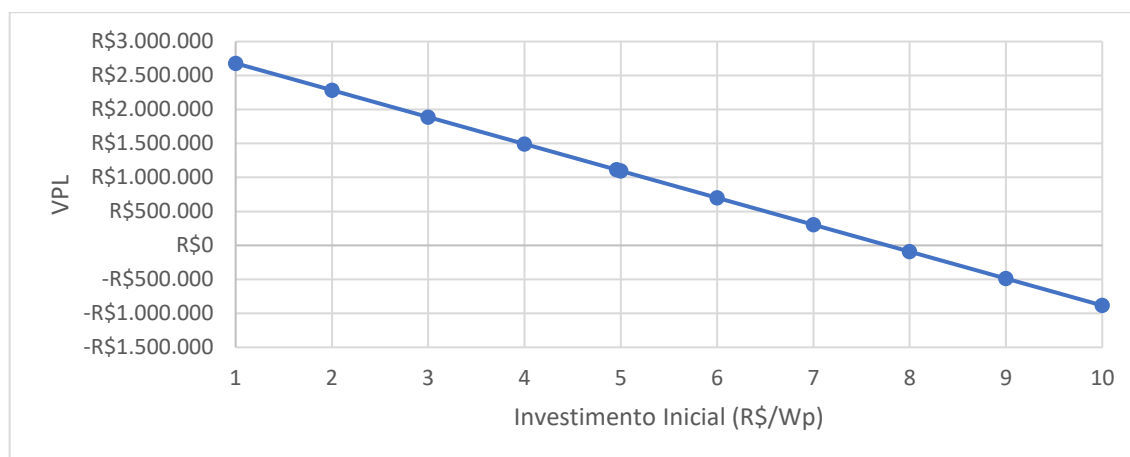


Figura 79 - Sensibilidade do VPL com relação ao investimento inicial



À medida em que o valor investido aumenta, a Taxa Interna de Retorno decresce exponencialmente, o que mostra a alta sensibilidade em relação ao investimento inicial. Quando o investimento inicial atinge o patamar de 8 R\$/Wp, a TIR tem como valor 6,5%, inferior à TMA estipulada (6,87%).

Referente ao *Payback* descontado, tem-se que este indicador cresce exponencialmente com o investimento inicial, sendo que, a partir de 7,77 R\$/Wp, o tempo para o retorno do investimento atinge o tempo de vida útil do projeto, inviabilizando o investimento.

Para o Valor Presente Líquido, temos que seu valor diminui linearmente com o aumento do Investimento inicial, tornando-se nulo para o mesmo valor de 7,77 R\$/Wp. A partir deste valor de investimento, o projeto apresenta prejuízos ao investidor.

Sendo assim, com a análise destes indicadores, pode-se estabelecer que o limite de viabilidade econômica deste sistema em relação ao investimento inicial é de 7,77 R\$/Wp. No contexto atual, este cenário é bastante improvável de ocorrer, já que a tendência do mercado mundial é para o barateamento dos sistemas fotovoltaicos.

Salienta-se que, apesar do tempo de vida útil ter sido considerado como 25 anos neste trabalho, a instalação fotovoltaica pode durar mais tempo. Este valor foi considerado pois este é o tempo que o fabricante dos módulos fotovoltaicos garante a operacionalidade das placas.

#### 4.3.5.2 Variação da Taxa Mínima de Atratividade (TMA)

A taxa mínima de atratividade é utilizada para referir todos os lançamentos do fluxo de caixa para o valor presente. Neste trabalho, considerou-se como TMA a taxa de longo prazo (TLP).

Com isto, aumentar a TMA é o mesmo que desvalorizar o valor futuro. Esta variação pode interferir na quantidade de lucro ou prejuízo do empreendimento no decorrer dos anos. As figuras a seguir mostram a sensibilidade do VPL e do tempo de retorno em relação à variação da taxa de juros.

Figura 80 - Sensibilidade do VPL com relação à TMA

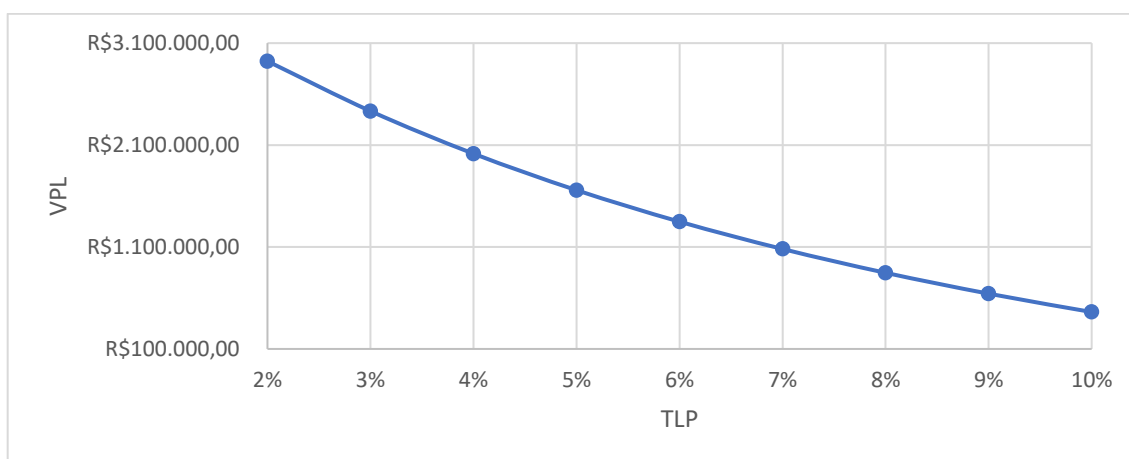
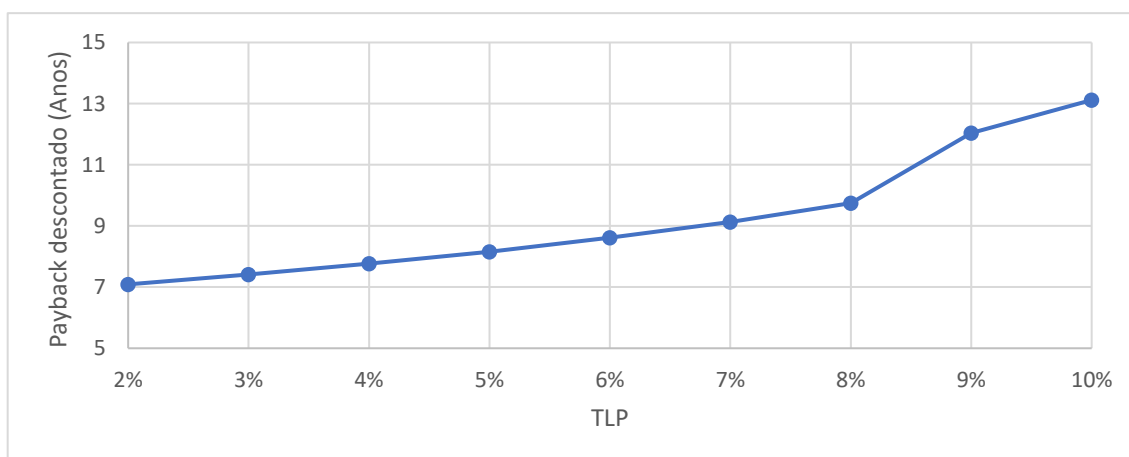


Figura 81 - Sensibilidade do Payback descontado com relação à TMA.



A TIR é o indicador econômico que mostra a taxa de juros que torna nulo o Valor Presente Líquido. Com isto, sua definição não leva em consideração o valor presente, não dependendo então do valor da taxa de juros.

Observando o comportamento do Valor Presente Líquido em função da variação da Taxa Mínima de Atratividade, percebe-se que mesmo com altos valores de juros, o VPL ainda apresenta saldo positivo. Para o *Payback* descontado, observa-se que mesmo com variações grandes na TMA, tem-se pequenas variações no tempo de retorno do projeto.

Com estes resultados, podemos concluir que a viabilidade econômica do projeto possui grande resistência em relação a variações na taxa de juros. Entretanto, observa-se que este parâmetro pode influenciar consideravelmente o lucro obtido no empreendimento.

#### 4.3.5.3 *Variação da taxa de degradação dos painéis*

A taxa de degradação dos painéis pode influenciar diretamente na produção de energia e, conseqüentemente na quantidade de energia a ser creditada, o que influencia diretamente todos os parâmetros econômicos analisados.

Como citado anteriormente, diversos estudos consideram a taxa de degradação dos painéis entre 0,5% e 1% ao ano. Desta forma, analisamos os indicadores econômicos do projeto em função da variação da degradação anual, dentro da referida faixa de valores.

Figura 82 - Sensibilidade da TIR com relação a taxa de degradação do sistema.

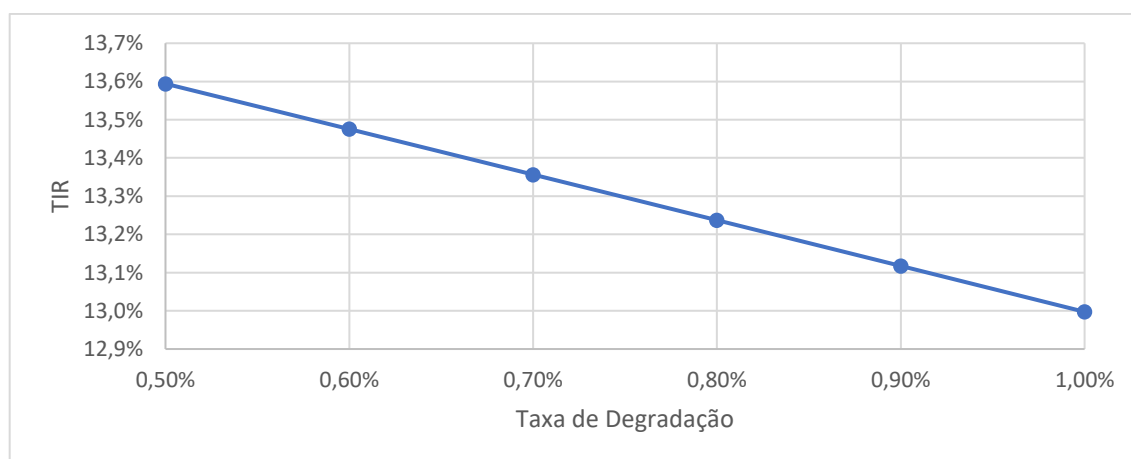




Figura 83 - Sensibilidade do VPL com relação a taxa de degradação do sistema.

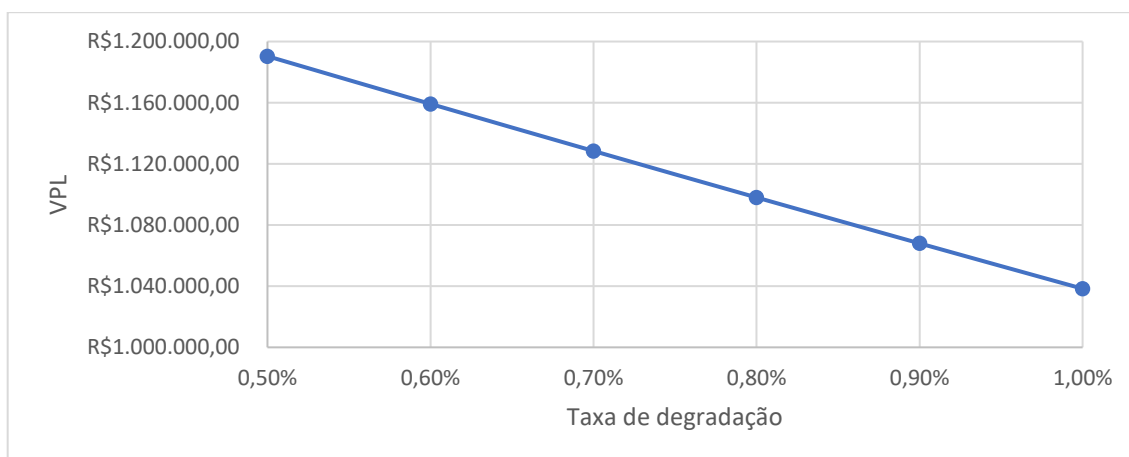
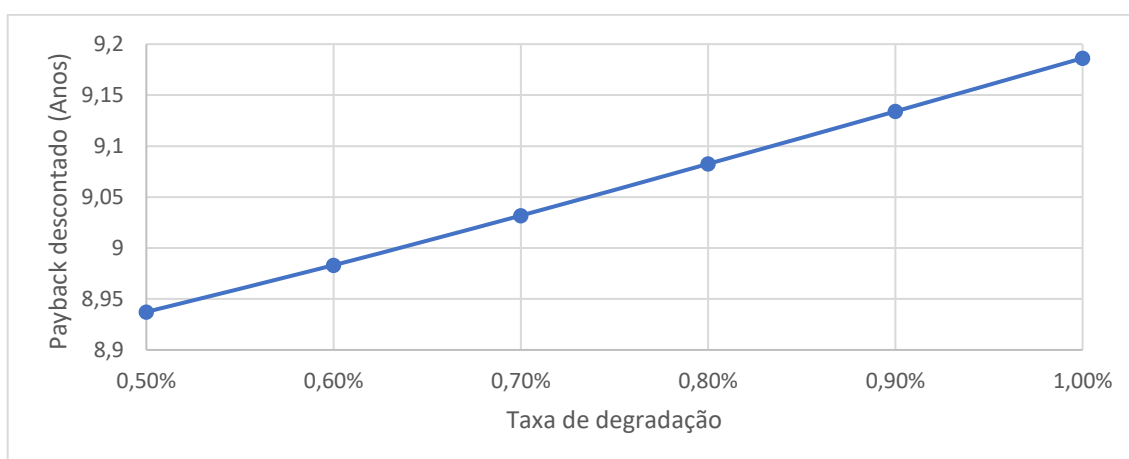


Figura 84 - Sensibilidade do Payback descontado com relação a taxa de degradação do sistema.



Como pode-se observar nas figuras acima, tanto a TIR como o VPL decrescem linearmente com o aumento na taxa de degradação dos módulos fotovoltaicos, enquanto que o tempo de retorno do projeto aumenta. Além disso, é fácil verificar que os indicadores citados não variam substancialmente com a variação da taxa de degradação, significando que o projeto feito mostra-se robusto em relação à degradação dos painéis.

Conclui-se então que a variação deste parâmetro, dentro da faixa de valores estipulada, não interfere grandemente na viabilidade econômica do projeto.

#### 4.3.5.4 Variação da tarifa de energia em relação à inflação

Na formação do fluxo de caixa, considerou-se que a tarifa de energia acompanha a taxa de inflação. Entretanto, sabe-se que é possível que hajam reajustes superiores ou inferiores à inflação, seja por crise energética, ou por questões fiscais.

Com isto, para esta análise, considera-se que ocorre um desencontro entre a tarifa de energia elétrica cobrada pela concessionária e a inflação, variando esta diferença entre -4% até o valor de 5% por ano, durante a vida útil considerada para o projeto.

Ou seja, os valores negativos de reajuste apresentam um barateamento da tarifa em relação à inflação, enquanto que os positivos significam o contrário. O valor nulo, considerado no fluxo de caixa apresentado, representa a igualdade entre o reajuste e a inflação.

Os resultados obtidos são mostrados nas figuras abaixo.

Figura 85 - Sensibilidade da TIR em relação ao reajuste tarifário

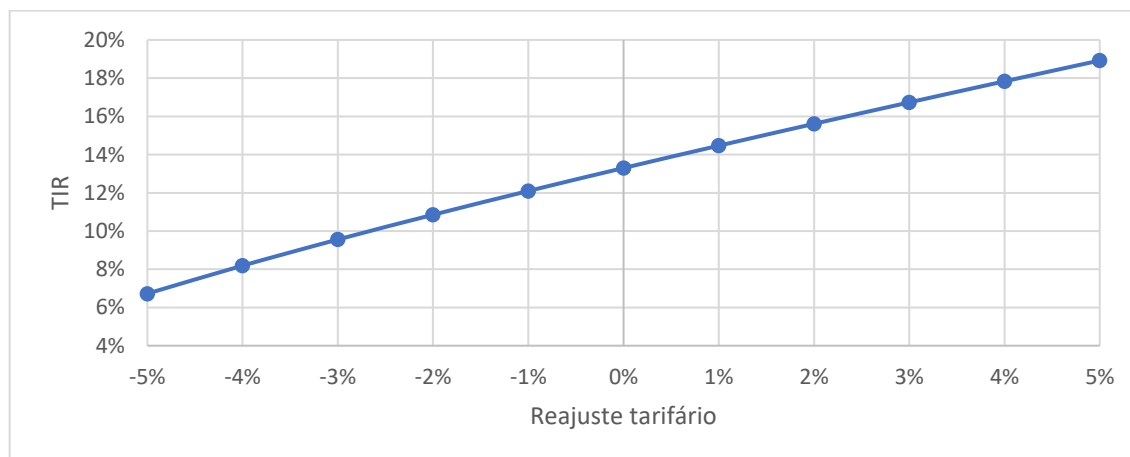


Figura 86 - Sensibilidade do VPL em relação ao reajuste tarifário

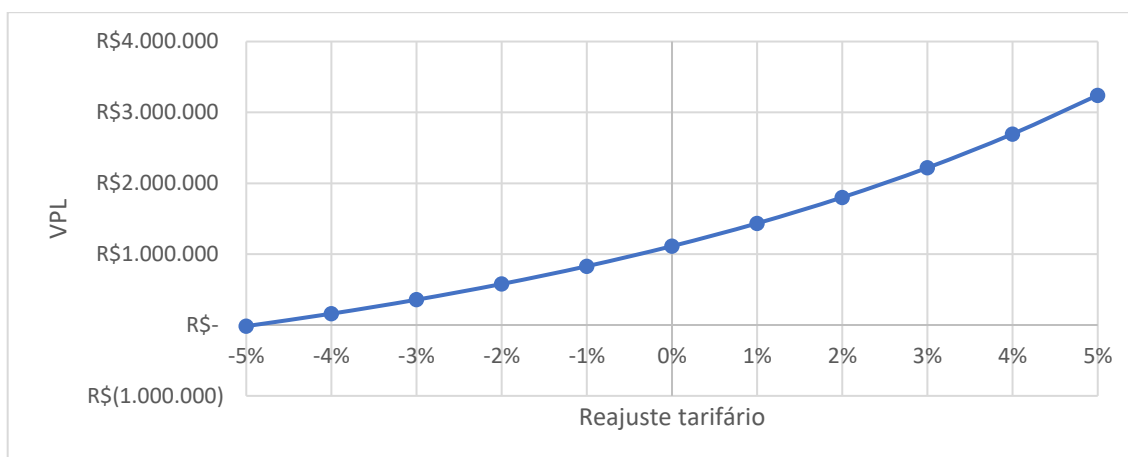
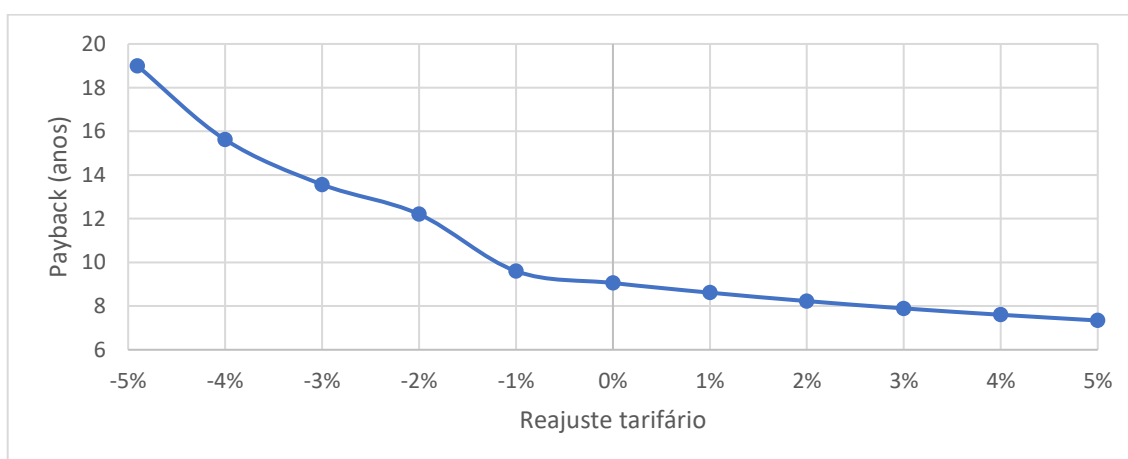


Figura 87 - Sensibilidade do Payback em relação ao reajuste tarifário



Os gráficos acima mostram que quanto maior o valor da tarifa de energia, mais lucrativo e com menos riscos se torna o empreendimento. Observando o comportamento do Valor Presente Líquido em relação à variação da tarifa, percebe-se que com um reajuste de -5% em relação à inflação, se tem um VPL negativo, indicando a inviabilidade do projeto. Além disso, para este valor de reajuste, ainda se tem uma Taxa interna de retorno inferior à TMA.

Pode-se perceber que o reajuste positivo da tarifa frente à inflação, ou seja, o encarecimento da tarifa, resulta em resultados bastante positivos para a viabilidade econômica do projeto. Por outro lado, o reajuste negativo, ou o barateamento da conta de energia, produz resultados significativos nesta viabilidade.

Deve-se ressaltar que tanto o cenário mais positivo como o cenário mais negativo para o projeto são improváveis de ocorrer nos próximos anos, sendo que a tendência é o reajuste da tarifa de energia ser de acordo com a inflação.

## 5. CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos no levantamento de consumo de energia dos anfiteatros do Instituto Central de Ciências da Universidade de Brasília, e nos estudos de viabilidade técnica e econômica na instalação de um sistema fotovoltaico no referido prédio, faz-se as seguintes considerações.

A partir da simulação termoenergética realizada, constatou-se que as hipóteses simplificadoras utilizadas neste trabalho influenciaram minimamente nos resultados obtidos. A capacidade dos sistemas sugeridos pelo software DesignBuider para os anfiteatros modelados foi muito próxima dos sistemas reais instalados, sendo a maior discrepância observada de 7,05%.

Para validar a modelagem realizada, realizou-se a medição de consumo de energia do aparelho de ar-condicionado do anfiteatro 2. Comparando o valor medido com o simulado, obteve-se uma diferença de 7,545%, um valor aceitável para a engenharia. Ressalta-se que este valor poderia ser ainda menor se não fosse as limitações do Template utilizado, principalmente referente à modelagem da vazão de ar de renovação.

O valor de consumo de energia de todos os anfiteatros do ICC, caso eles operem de acordo com proposto por este trabalho, totaliza 639,04 MWh por ano, representando 2,92% do consumo anual de energia de todo o campus. Referente à demanda, constatou-se que a correta operação dos equipamentos de condicionamento de ar, não produz alterações significativas na demanda elétrica da Universidade.

Percebeu-se que os aparelhos de ar-condicionado presente nos anfiteatros são altamente ineficientes, sendo eles classificados como Classe C pelo PROCEL. A utilização de aparelhos mais eficientes resultaria em uma enorme economia de energia, já que estes aparelhos são os grandes responsáveis pelo alto valor de consumo obtido.

Além disso, constatou-se que os sistemas de renovação de ar dos anfiteatros, com exceção dos anfiteatros 4 e 12, não são capazes de manter uma qualidade de ar interior adequada, sendo a vazão das caixas de ventilação muito pequena. Ressalta-se que a qualidade do ambiente interno tem impacto direto na produtividade das pessoas e no rendimento de processos de aprendizagem, fortemente influenciados pelo sentimento de bem-estar dos ocupantes. A falta da renovação de ar em ambientes climatizados também é propícia para a disseminação de vírus e bactérias, afetando diretamente na saúde dos alunos.

Com o valor de consumo de 639,04 MWh/ano, projetou-se um sistema fotovoltaico para suprir esta energia. Realizando preliminarmente um estudo de sombreamento no Instituto Central de Ciências, obteve-se uma área disponível de 8838,39 m<sup>2</sup> no Bloco B do prédio, desprezando no estudo as sombras causadas pelas condensadoras presentes no telhado e pelas árvores ao redor, além de desprezar 5 metros de cada lado do telhado para não alterar a fachada do ICC e afetar o seu tombamento.

Com o software PVSyst, foi dimensionado um sistema fotovoltaico de 396 kWp, dividido em 18 subsistemas de 22 kWp, um para cada anfiteatro. Este sistema é capaz de gerar cerca de 640,62 MWh/ano e ocupa uma área de 2358 m<sup>2</sup>.

Cada subsistema possui 80 módulos fotovoltaicos e 1 inversor, sendo que o inversor deverá ser instalado no quadro elétrico de cada anfiteatro. Os módulos de cada subsistema foram dispostos nas alas Sul e Norte do bloco B do ICC, sendo cada subsistema instalado acima de cada anfiteatro. Isto resulta em uma maior proximidade da geração com a carga, reduzindo custos e perdas.

Com o sistema fotovoltaico proposto, observou-se uma economia anual de R\$ 326.567,19.

Utilizando os valores de componentes em setembro de 2018, chega-se à conclusão de que é necessário um investimento inicial de R\$ 1.963.067,80, ou seja, 4,96 R\$/Wp. Os gastos anuais com operação e manutenção é da ordem de R\$ 19.630,68.

Ao final da vida útil do projeto, estipulada em 25 anos, encontra-se um Valor Presente Líquido de R\$ 1.113.167,56, que representa um Retorno de Investimento de 56,71%. A Taxa Interna de Retorno de 13,3% e um *Payback* descontado de 9,06 anos. Com estes resultados, conclui-se que o investimento é viável e rentável. Além disso,

calculou-se um custo de 0,309 R\$/kWh para o sistema fotovoltaico, um valor bem abaixo da tarifa de 0,5098 R\$/kWh cobrada em bandeira verde pela distribuidora.

Analisando a sensibilidade do projeto, se percebe que o principal parâmetro de entrada que influencia nos indicadores econômicos é o investimento inicial. Este parâmetro resulta em uma TIR com comportamento exponencial à medida que este investimento se torna cada vez menor, configurando então uma proposta cada vez mais interessante. O mercado segue esta tendência de diminuição de preços, já que a cada ano domina-se cada vez mais a tecnologia e se amadurece o processo produtivo, além dos crescentes investimentos em incentivos para o uso de energias renováveis.

O segundo parâmetro que mais influencia nos indicadores econômicos é a diferença entre a tarifa cobrada pela distribuidora e a inflação. Se o reajuste tarifário for maior que a inflação, se observa maiores lucros provenientes do sistema fotovoltaico instalada. Em um cenário contrário, caso a inflação seja maior que o reajuste, o lucro diminui.

As variações na Taxa Mínima de Atratividade mostraram que a viabilidade econômica do projeto realizado possui grande resistência em relação a esse parâmetro, mantendo sua rentabilidade nos cenários mais desfavoráveis. A taxa de degradação dos módulos fotovoltaicos pouco influencia a proposta.

Os cenários em que o projeto não é economicamente viável são altamente improváveis de ocorrer, dada a tendência mundial na diminuição dos preços dos sistemas fotovoltaicos e o reajuste da tarifa de energia em Brasília ser de acordo com a inflação.

Em posse destes resultados, chega-se à conclusão que a instalação de sistemas fotovoltaicos é altamente atraente para a Universidade de Brasília, não só economicamente, mas também em relação aos aspectos acadêmicos e ambientais. A instalação de um sistema fotovoltaico no principal prédio da universidade seria um grande atrativo e um grande incentivo aos alunos. O uso de fontes renováveis e o incentivo à ciência e tecnologia deve ser um valor intrínseco do meio universitário.

Em relação à simulação termoenergética, esta ferramenta se mostrou uma poderosa ferramenta para o levantamento do consumo de energia dos anfiteatros. Apesar da necessidade de conhecimentos multidisciplinares, o uso de simulações deste tipo pode ser bastante proveitoso nos contextos da Engenharia Elétrica, não só

para levantamento de consumo de energia de ambientes reais, mas também para análises de eficiência energética e tomadas de decisão em projetos.

Espera-se que o desenvolvimento deste trabalho incentive o investimento em fontes renováveis de energia por parte da universidade, além de promover o uso de simulações termoenergéticas no contexto da Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília. A eficiência energética de edificações é um tema cada vez mais importante no Brasil, sendo o uso de softwares de simulação uma ferramenta cada vez mais essencial.

Por fim, para continuidade e motivação de trabalhos futuros, se sugere:

- Realizar análise estrutural da fixação do projeto proposto neste trabalho e o impacto deste no Instituto Central de Ciências.
- Realizar um estudo detalhado sobre a redução de demanda elétrica na Universidade de Brasília causada pelo sistema fotovoltaico proposto, levando-se em consideração os impactos na tarifa de energia da universidade.
- Simulação termoenergética completa de um prédio, medindo os valores de consumo de energia por maiores períodos de tempo e comparando com os valores simulados.
- Propor medidas de eficiência energética para prédios da Universidade de Brasília, avaliando os cenários propostos através de simulação termoenergética e quantificando a economia anual de energia e seus impactos na tarifa da universidade.
- Estudo de aproveitamento de outras formas de energia no contexto do campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília.
- Realizar o projeto de um edifício de energia zero, do inglês *Net Zero Energy Building*, onde o consumo de energia anual do prédio é zerado por uma combinação de alta eficiência energética e geração de energia por fontes renováveis.

## BIBLIOGRAFIA

ABINEE – Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica. **Propostas para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira** – 2012. Acesso em: 11 de novembro de 2018.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 5410: **Instalações Elétricas de Baixa Tensão**. Rio de Janeiro, 2004. 209p.

ANDRADE, F. D. **Estudo de caso: Simulação computacional de desempenho energético do edifício da empresa MGD Eficiência Energética**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, p. 53. 2016.

ANEEL. **Chamada nº 001/2016 - Projeto Prioritário de Eficiência Energética e Estratégico de P&D: Eficiência Energética e Minigeração em Instituições Públicas de Educação Superior**. ANEEL. Brasília, 2016.

ANEEL. **Cadernos Temáticos da ANEEL: Micro e Minigeração Distribuída - Sistema de compensação de energia elétrica**. ANEEL. Brasília, p. 31. 2016.

BARBOSA, Luan Krishna Peres. **Análise técnico-econômica acerca de diferentes sistemas de geração de energia solar fotovoltaica com base no projeto Jaíba Solar** [Distrito Federal], 2015.

BARBOSA, T. P. **Auditoria Energética e Simulação Dinâmica de um edifício público**. Escola Superior de Tecnologia e Gestão. Bragança, p. 93. 2017.

BELTRAM, L. **Simulação computacional do desempenho energético de uma edificação comercial**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 69. 2015.

BERTASSO, R. D. M. **ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EM EDIFÍCIOS PÚBLICOS UNIVERSITÁRIOS**. Universidade de Brasília. Brasília, p. 101. 2016.

BEYER, F. V. **Apostila de Conforto Térmico**. DEMEC/UFRGS. Porto Alegre. 2011.

BNDES. (2018). **Taxa de Longo Prazo**., disponível em Banco Nacional do Desenvolvimento Social:  
<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/guia/custosfinanceiros/tlp-taxa-de-longo-prazo>. Acesso em 31 de outubro de 2018

BRANKER, K; PATHAK, M.J.M; PEARCE, J.M. **A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 15, p.



4470–4482, 2011.

BRUNDTLAND, Gro Hariem. **World commission on environment and development. Environmental policy and law**, v. 14, n. 1, p. 26-30, 1985.

BONA, A. **Retorno sobre Investimento (ROI): O que é e como calcular?** Disponível em: <https://andrebona.com.br/retorno-sobre-investimento-roi-o-que-e-e-como-calculiar/>. Acesso em 29 de novembro de 2018.

CAMARGO, I. M. de T. **Noções básicas de engenharia econômica: aplicações ao setor elétrico**. Brasília: FINATEC, 1998. 160p.

CARMO, A. T.; PRADO, T. A. **Qualidade do ar interno**. USP. São Paulo, p. 38. 1999.

CLARKE, J. A. **Energy simulation in building design**. Oxford: Butterworth Heinemann, 2002. 362p. :il.

CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: [www.cresesb.cepel.br](http://www.cresesb.cepel.br). Acesso em 15 de novembro de 2018

DESIGNBUILDER. **Welcome to DesignBuilder, 2016**. Disponível em: <http://www.designbuilder.co.uk/helpv5.0/>. Acesso em: 14 Novembro 2018.

DUARTE, M. M. (2016). **Análise técnico-econômica acerca da implementação de geração solar fotovoltaica no Centro de Ensino Médio Taguatinga Norte**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica, 2016, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 136p.

ENERGYPLUS. **Getting Started with EnergyPlus. EnergyPlus Documentation**, 2015. Disponível em: [https://energyplus.net/sites/default/files/pdfs\\_v8.3.0/GettingStarted.pdf](https://energyplus.net/sites/default/files/pdfs_v8.3.0/GettingStarted.pdf). Acesso em: 14 Novembro 2018.

EPE. **Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira**. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília, p. 64. 2012.

FAGUNDES, S. F. **Simulação termoenergética e proposta de melhoria em espaços de ensino e aprendizagem: estudo de caso campus unisinos são leopoldo**. Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, p. 84. 2016.

FINDER. **Guia para aplicação de Dispositivos de Proteção contra Surtos - DPS**, 2012. Disponível em: <http://www.instalacoeseletricas.com/Findernet/download/section/PDFs/guia-dps.pdf>. Acesso em: 31 Outubro 2018.

FRONTIN, Sérgio de Oliveira et al. (Org.). **Usina fotovoltaica Jaíba solar: Planejamento e Engenharia**. 1ª. ed. Brasília: [s.n.], 2017. 528 p.

FONSECA, R. P. D. **A ESTRUTURA DO INSTITUTO CENTRAL DE CIÊNCIAS: Aspectos históricos, científicos e tecnológicos de projeto, execução, intervenções e proposta de manutenção..** Universidade de Brasília. Brasília, p. 234. 2007.

GREGORIO, J. V. (2017). **Modelagem do sistema elétrico do Campus Darcy Ribeiro da UnB para avaliação da inserção de sistemas fotovoltaicos**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica, 2017, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 173p.

GSES- Global Sustainable Energy Solutions. **Grid-Connected PV Systems: Design and Installation** Edition 8th Edition Austrália,NSW, 2015.

GÓMEZ, L. A.; LAMBERTS, R.; SIGNOR, R.. **Comparação de resultados de simulação com o consumo energético medido num edifício de escritórios**. Departamento de engenharia civil, UFSC, Florianópolis, 1994.

IEA. Renewables 2018 - Market analysis and forecast from 2018 to 2023. **International Energy Agency**, 2018. Disponível em: <<https://www.iea.org/renewables2018/>>. Acesso em: 16 Novembro 2018.

IEA. World Energy Outlook 2018. **International Energy Agency**, 2018. Disponível em: <<https://www.iea.org/weo2018/scenarios/>>. Acesso em: 2018 Novembro 2018.

INSTITUTO IDEAL. O Mercado Brasileiro de Geração Distribuída Fotovoltaica – Edição 2018. **Ideal - Instituto para o desenvolvimento de energias alternativas na América Latina**, 2018. Disponível em: <<http://institutoideal.org/o-mercado-brasileiro-de-geracao-distribuida-fotovoltaica-edicao-2018/>>. Acesso em: 28 Outubro 2018.

IPHAN. Perguntas frequentes. **IPHAN**, 27 Outubro 2018. Disponível em: <<http://portal.iphan.gov.br/perguntasFrequentes?categoria=9>>.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F.. **Eficiência energética na arquitetura**. São Paulo: PW Editores, 1997. p. 192.

LEE, A. S.; WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R.. **Verificação da eficiência energética de um edifício de escritórios através de simulação computacional: estudo de caso no departamento de engenharia civil da UFSC**. In: Encontro Nacional sobre Conforto no Ambiente Construído, VI, 2001, São Pedro. Anais... São

Pedro. ENCAC. 2001.

MENDES, Nathan et al. **Uso de instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico e energético de edificações no Brasil**. Ambiente Construído, v. 5, n. 4, 2005.

MMA- Ministério do Meio Ambiente. **Clima**. Disponível em: [www.mma.gov.br](http://www.mma.gov.br). Acesso em: 14 de novembro de 2018.

MME. **Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro**. Ministério de Minas e Energia. Brasília, p. 33. 2018.

NASCIMENTO, R. L. **Energia solar no Brasil: situação e perspectivas**. Câmara dos deputados - Estudo Técnico. Brasília, p. 46. 2017.

NICO, M. A.; LIUZZI, S. STEFANIZZI, P.; **Evaluation of termal comfort in university classrooms through objetctive approach and subjective preference analysis**. Applied ergonomics, v. 48, 2015.

ONU. A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. **ONU BR - Nações Unidas no Brasil**, 2015. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/>. Acesso em: 16 Novembro 2018.

ONU. Adoção do acordo de Paris. **Acordo de Paris sobre o clima**, 2015. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/acordodeparis/>. Acesso em: 14 novembro 2018.

PARIS AGREEMENT. **PARIS AGREEMENT SHORT GLOSSARY**. 2015. Disponível em: [cop21.gouv.fr](http://cop21.gouv.fr). Acesso em: 14 de novembro de 2018.

PROCEL. **Sistemas de ar condicionado**. Rio de Janeiro, p. 148. 2011.

PVSYST. PVSyst Contextual Help, 2012. Disponível em: <http://files.pvsyst.com/pvsyst5.pdf>. Acesso em: 29 Outubro 2018.

RIBEIRO, S. L. **Espaço escolar: um elemento (in)visível no currículo**. Sutuentibus, Feira de Santana, n. 31, 2004.

SEPPANEN, O.; FISK, W. J.; LEI, Q. H. **Effect of temperature on task performance in office environment**. Lawrence Berkeley National Laboratory. Finland, p. 12. 2006.

SILVA, R. M. **Energia Solar: dos incentivos aos desafios**. Texto para discussão nº 166. Brasília. Senado Federal, 2015

THEVENARD, D.; A., DRIESSE; S., PELLAND; TURCOTTE, D.; POISSANT, Y. **Uncertainty in Long-Term Photovoltaic Yield Predictions**, report #2010-122 (RPTEC) Canada, Natural Resources Canada Canmet, 2010. 52p.

TOLMASQUIM, M. T. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Rio de Janeiro, p. 452. 2016. (ISBN 978-85-60025-06-0).

VILLALVA, G.; GAZOLI, J. R. **Energia Solar fotovoltaica - Conceitos e aplicações**. 1ª. ed. São Paulo: Érica, 2013.

## **APÊNDICES**

## Apêndice A

### Dados climáticos de Brasília utilizados na simulação do consumo de energia medido

**Tabela 33 - Dados climáticos de Brasília no dia 21 de junho de 2018.**

Hora	Temp. (°C)	Umidade (%)	Pto. Orvalho (°C)	Pressão (hPa)	Dir. do Vento ( ° )	Velocidade do vento (m/s)	Radiação (kJ/m²)
0	19.4	62	11.9	892.1	3.4	87	-3.54
1	18.7	66	12.2	892.3	4.0	94	-3.54
2	17.8	69	12.1	892.2	3.3	96	-3.54
3	17.2	72	12.0	892.1	3.1	94	-3.54
4	17.1	72	12.0	891.9	2.3	102	-3.54
5	16.5	74	11.8	891.3	2.8	101	-3.54
6	16.4	74	11.7	891.1	3.5	100	-3.54
7	15.7	77	11.7	891.1	3.4	98	-3.54
8	14.8	80	11.4	891.4	1.7	100	-3.54
9	14.9	81	11.7	891.8	1.4	64	-3.54
10	15.3	81	12.1	892.3	2.5	81	4.502
11	16.7	77	12.6	892.7	3.8	70	418.3
12	18.5	69	12.8	893.2	3.5	73	1199.
13	20.1	64	13.1	893.2	3.9	76	1887.
14	21.9	56	12.7	893.0	4.2	83	2436.
15	22.2	52	11.9	892.4	4.3	90	2773.
16	23.1	49	11.8	891.5	3.1	71	2712.
17	24.2	43	10.7	890.8	3.4	101	2499.
18	24.1	42	10.3	890.5	2.8	106	1959.
19	23.9	40	9.4	890.3	2.9	72	1561.
20	22.6	40	8.5	890.8	2.0	116	648.1
21	21.5	49	10.3	891.1	2.3	104	100.8
22	20.6	54	10.8	891.4	1.9	111	-3.54
23	20.0	58	11.4	892.0	1.3	88	-3.54

Fonte:INMET.Disponível em:

<<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>>. Acesso em 30 de junho de 2018.

## Apêndice B

### Cronogramas de ocupação para os anfiteatros 4 e 7.

Tabela 34 - Cronograma de ocupação para um dia típico do anfiteatro 4

HORÁRIO	DISCIPLINAS (SEGUNDA FEIRA)	Nº DE PESSOAS MATRICULADAS	PERCENTUAL DE OCUPAÇÃO
06:00:00	-		0%
07:00:00	-		0%
08:00:00	Int. a anatomia vegetal - Turmas a, b, c, d, e;	165	83%
09:00:00	Int. a anatomia vegetal - Turmas a, b, c, d, e;	165	83%
10:00:00	Cálculo 2 - Turma I	66	33%
11:00:00	Cálculo 2 - Turma I	66	33%
12:00:00	-	-	0%
13:00:00	-	-	0%
14:00:00	Cálculo 3 - Turma A	65	33%
15:00:00	Cálculo 3 - Turma A	65	33%
16:00:00	Matemática 1 - Turmas A, AB e B	139	70%
17:00:00	Matemática 1 - Turmas A, AB e B	139	70%
18:00:00	-	-	0%
19:00:00	Cálculo 2 - Turma H	66	33%
20:00:00	Cálculo 2 - Turma H	66	33%
21:00:00	Física 3 - Turma G	37	19%
22:00:00	Física 3 - Turma G	37	19%
23:00:00	Física 3 - Turma G	37	19%
00:00:00	-	-	0%

Tabela 35 – Cronograma de ocupação para um dia típico do anfiteatro 7

<b>HORÁRIO</b>	<b>DISCIPLINAS (SEGUNDA FEIRA)</b>	<b>Nº DE PESSOAS MATRICULADAS</b>	<b>PERCENTUAL DE OCUPAÇÃO</b>
06:00:00	-	-	<b>0%</b>
07:00:00	-	-	<b>5%</b>
08:00:00	Cálculo 2 - Turma F	66	<b>45%</b>
09:00:00	Cálculo 2 - Turma F	66	<b>45%</b>
10:00:00	Cálculo 1 - Turma M	67	<b>46%</b>
11:00:00	Cálculo 1 - Turma M	67	<b>46%</b>
12:00:00	-	-	<b>5%</b>
13:00:00	-	-	<b>5%</b>
14:00:00	Cálculo Numérico - Turma D	45	<b>31%</b>
15:00:00	Cálculo Numérico - Turma D	45	<b>31%</b>
16:00:00	Introdução a sociologia - Turma C	102	<b>69%</b>
17:00:00	Introdução a sociologia - Turma C	102	<b>69%</b>
18:00:00	-	-	<b>0%</b>
19:00:00	APC - Turmas B e H	115	<b>78%</b>
20:00:00	APC - Turmas B e H	115	<b>78%</b>
21:00:00	Cálculo 1 - Turma P	87	<b>59%</b>
22:00:00	Cálculo 1 - Turma P	87	<b>59%</b>
23:00:00	-	-	<b>0%</b>
00:00:00	-	-	<b>0%</b>



## Apêndice C

### Dados utilizados na seção 4.1.6

Tabela 36 - Valores de consumo de energia no anfiteatro 2

<b>ANF2 Mês</b>	<b>Sistema de ar condicionado (kWh)</b>	<b>Iluminação (kWh)</b>	<b>Tomadas (kWh)</b>	<b>Motor da caixa de ventilação (kWh)</b>	<b>Total (kWh)</b>
1	2309,13	434,20	37,619774	18,63	2800,50
2	0,00	0,00	0	0,00	0,00
3	2992,11	660,26	63,479619	24,13	3741,21
4	2619,26	574,14	55,199669	21,13	3270,79
5	2735,75	660,26	63,479619	22,07	3482,67
6	2152,37	631,56	60,719636	17,36	2862,88
7	0,00	0,00	0	0,00	0,00
8	2203,86	660,26	63,479619	17,78	2946,27
9	2588,33	602,85	57,959652	20,88	3271,07
10	2738,17	631,56	60,719636	22,09	3453,65
11	2825,58	631,56	60,719636	22,79	3541,80
12	0,00	0,00	0	0,00	0,00

Tabela 37 - Valores de consumo de energia no anfiteatro 3

<b>ANF3 Mês</b>	<b>Sistema de ar condicionado (kWh)</b>	<b>Iluminação (kWh)</b>	<b>Tomadas (kWh)</b>	<b>Motor da caixa de ventilação (kWh)</b>	<b>Total (kWh)</b>
1	3501,87	684,38	52,67	22,58	4263,03
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	4273,39	1040,71	55,06	27,55	5398,58
4	3763,75	904,96	47,88	24,27	4742,50
5	3923,81	1040,71	55,06	25,30	5046,60
6	2941,45	995,46	52,67	18,97	4009,84
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	2916,42	1040,71	55,06	18,80	4032,27
9	3659,52	950,21	50,27	23,60	4685,21
10	3865,74	995,46	52,67	24,93	4940,48
11	3999,91	995,46	52,67	25,79	5075,58
12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela 38 - Valores de consumo de energia no anfiteatro 4

<b>ANF4 Mês</b>	<b>Sistema de ar condicionado (kWh)</b>	<b>Iluminação (kWh)</b>	<b>Tomadas (kWh)</b>	<b>Total (kWh)</b>
1	5053,24	832,48	75,24	5960,96
2	0,00	0,00	0,00	0,00
3	6176,54	1265,92	78,66	7521,12
4	5504,44	1100,80	68,40	6673,65
5	5317,23	1265,92	78,66	6661,82
6	4205,58	1210,88	75,24	5491,70
7	0,00	0,00	0,00	0,00
8	4411,01	1265,92	78,66	5755,60
9	5264,48	1155,84	71,82	6492,14
10	5477,20	1210,88	75,24	6763,32
11	5516,87	1210,88	75,24	6802,99
12	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela 39 - Valores de consumo de energia no anfiteatro 7

<b>ANF7 Mês</b>	<b>Sistema de ar condicionado (kWh)</b>	<b>Iluminação (kWh)</b>	<b>Tomadas (kWh)</b>	<b>Motor da caixa de ventilação (kWh)</b>	<b>Total (kWh)</b>
1	3567,62	701,80	52,67	23,37	4346,65
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	4746,36	1067,20	55,06	31,09	5901,31
4	4133,95	928,00	47,88	27,08	5138,29
5	4454,07	1067,20	55,06	29,18	5607,00
6	3458,57	1020,80	52,67	22,66	4555,86
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	3423,75	1067,20	55,06	22,43	4569,59
9	4081,06	974,40	50,27	26,73	5133,84
10	4336,31	1020,80	52,67	28,41	5439,64
11	4518,18	1020,80	52,67	29,60	5622,76
12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela 40 - Valores de consumo de energia no anfiteatro 11

<b>ANF11 Mês</b>	<b>Iluminação (kWh)</b>	<b>Tomadas (kWh)</b>	<b>Total (kWh)</b>
1	629,69	62,70	692,39
2	0,00	0,00	0,00
3	957,55	105,80	1063,35
4	832,65	92,00	924,65
5	957,55	105,80	1063,35
6	915,91	101,20	1017,11
7	0,00	0,00	0,00
8	957,55	105,80	1063,35
9	874,28	96,60	970,88
10	915,91	101,20	1017,11
11	915,91	101,20	1017,11
12	0,00	0,00	0,00

Tabela 41 - Valores do consumo de energia de todos os anfiteatros do ICC

<b>Mês</b>	<b>Semelhantes ao anf. 2 (kWh)</b>	<b>Semelhantes ao anf. 3 (kWh)</b>	<b>Semelhantes ao anf. 4 (kWh)</b>	<b>Semelhantes ao anf. 7 (kWh)</b>	<b>Semelhantes ao anf.11 (kWh)</b>	<b>Total Geral (kWh)</b>
1	16803,03	4263,03	11921,92	26079,91	2077,17	61145,07
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	22447,23	5398,58	15042,24	35407,87	3190,04	81485,96
4	19624,72	4742,50	13347,29	30829,77	2773,95	71318,23
5	20896,03	5046,60	13323,63	33642,01	3190,04	76098,31
6	17177,30	4009,84	10983,40	27335,14	3051,34	62557,02
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	17677,64	4032,27	11511,19	27417,53	3190,04	63828,67
9	19626,41	4685,21	12984,28	30803,04	2912,64	71011,57
10	20721,88	4940,48	13526,65	32637,86	3051,34	74878,21
11	21250,77	5075,58	13605,98	33736,55	3051,34	76720,24
12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Anual</b>	<b>176225,02</b>	<b>42194,09</b>	<b>116246,59</b>	<b>277889,67</b>	<b>26487,91</b>	<b>639043,27</b>

## **ANEXO**

**RELATÓRIO GERADO PELO PVSYST PARA O SUBSISTEMA  
FOTOVOLTAICO DE 22 kW<sub>p</sub> NOMINAIS**

PVSYST V6.70		08/10/18		Page 1/3																			
<h2 style="text-align: center;">Grid-Connected System: Simulation parameters</h2>																							
<b>Project :</b>		<b>ICC_anfs2</b>																					
<b>Geographical Site</b>		<b>Brasilia</b>		<b>Country Brazil</b>																			
<b>Situation</b>		Latitude -15.78° S		Longitude -47.93° W																			
Time defined as		Legal Time Time zone UT-3		Altitude 1160 m																			
<b>Meteo data:</b>		<b>Brasilia</b>		INMET 2012 - TMY																			
<b>Simulation variant :</b>		<b>New simulation variant</b>																					
		Simulation date 08/10/18 17h11																					
<b>Simulation parameters</b>		<b>System type No 3D scene defined</b>																					
<b>Collector Plane Orientation</b>		Tilt 23°		Azimuth 0°																			
<b>Models used</b>		Transposition Perez		Diffuse Imported																			
<b>Horizon</b>		Free Horizon																					
<b>Near Shadings</b>		No Shadings																					
<b>PV Array Characteristics</b>																							
<b>PV module</b>		<b>Si-poly Model CS6K - 275P</b>																					
Original PVsyst database		Manufacturer Canadian Solar Inc.																					
Number of PV modules		In series 20 modules		In parallel 4 strings																			
Total number of PV modules		Nb. modules 80		Unit Nom. Power 275 Wp																			
Array global power		Nominal (STC) <b>22.00 kWp</b>		At operating cond. 19.76 kWp (50°C)																			
Array operating characteristics (50°C)		U mpp 554 V		I mpp 36 A																			
Total area		Module area <b>131 m²</b>		Cell area 117 m²																			
<b>Inverter</b>		<b>Model Symo 20.0-3-M</b>																					
Custom parameters definition		Manufacturer Fronius International																					
Characteristics		Operating Voltage 200-800 V		Unit Nom. Power 20.0 kWac																			
Inverter pack		Nb. of inverters 2 * MPPT 50 %		Total Power 20 kWac																			
				Pnom ratio 1.10																			
<b>PV Array loss factors</b>																							
Array Soiling Losses				Loss Fraction 5.0 %																			
Thermal Loss factor		Uc (const) 29.0 W/m²K		Uv (wind) 0.0 W/m²K / m/s																			
Wiring Ohmic Loss		Global array res. 262 mOhm		Loss Fraction 1.5 % at STC																			
Module Quality Loss				Loss Fraction -0.5 %																			
Module Mismatch Losses				Loss Fraction 1.0 % at MPP																			
Strings Mismatch loss				Loss Fraction 0.10 %																			
Incidence effect (IAM): User defined IAM profile																							
<table border="1"> <tr> <td>10°</td> <td>20°</td> <td>30°</td> <td>40°</td> <td>50°</td> <td>60°</td> <td>70°</td> <td>80°</td> <td>90°</td> </tr> <tr> <td>0.998</td> <td>0.998</td> <td>0.995</td> <td>0.992</td> <td>0.986</td> <td>0.970</td> <td>0.917</td> <td>0.763</td> <td>0.000</td> </tr> </table>						10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°	0.998	0.998	0.995	0.992	0.986	0.970	0.917	0.763	0.000
10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°															
0.998	0.998	0.995	0.992	0.986	0.970	0.917	0.763	0.000															
<b>User's needs :</b>		Unlimited load (grid)																					

Grid-Connected System: Main results

Project :

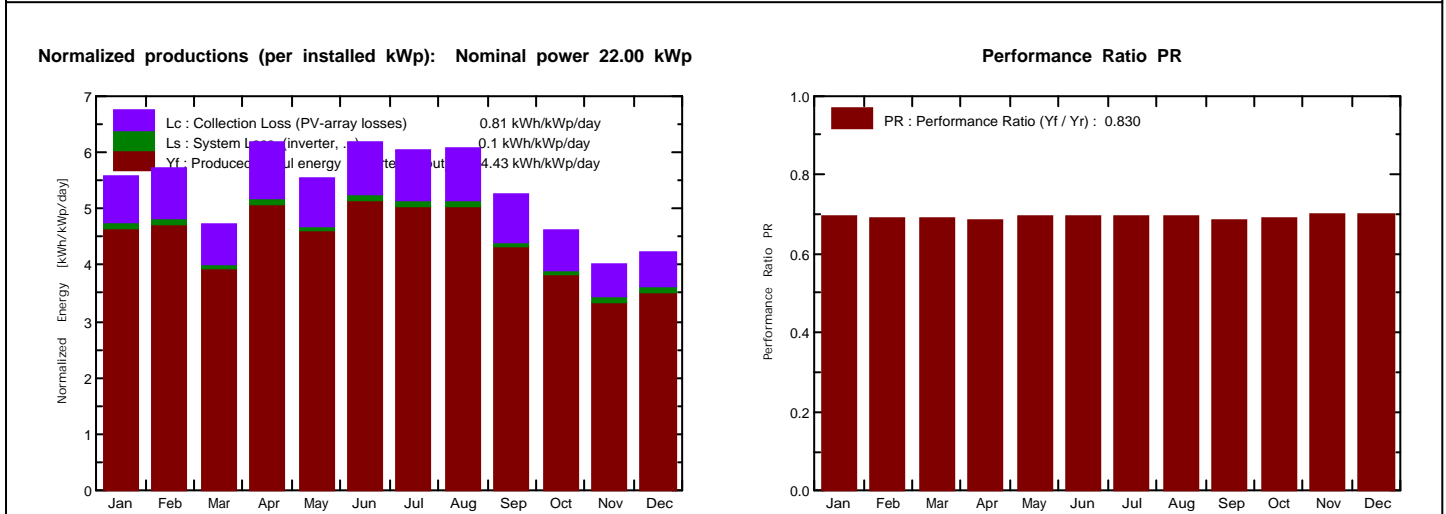
ICC\_anfs2

Simulation variant :

New simulation variant

<b>Main system parameters</b>		System type	<b>Grid-Connected</b>		
PV Field Orientation		tilt	23°	azimuth	0°
PV modules		Model	CS6K - 275P	Pnom	275 Wp
PV Array		Nb. of modules	80	Pnom total	<b>22.00 kWp</b>
Inverter		Model	Symo 20.0-3-M	Pnom	20.00 kW ac
User's needs		Unlimited load (grid)			

<b>Main simulation results</b>					
System Production		<b>Produced Energy</b>	<b>35.59 MWh/year</b>	Specific prod.	1618 kWh/kWp/year
		Performance Ratio PR	83.04 %		



New simulation variant								
Balances and main results								
	GlobHor	DiffHor	T Amb	GlobInc	GlobEff	EArray	E_Grid	PR
	kWh/m²	kWh/m²	°C	kWh/m²	kWh/m²	MWh	MWh	
January	190.7	89.72	22.06	172.7	160.6	3.235	3.168	0.834
February	168.2	77.36	22.42	160.1	149.2	2.969	2.906	0.825
March	144.2	75.92	21.11	146.7	136.4	2.739	2.679	0.830
April	165.7	62.92	21.78	185.1	172.5	3.422	3.349	0.822
May	143.6	57.73	20.78	171.8	160.1	3.206	3.138	0.830
June	146.1	49.43	19.50	185.0	172.5	3.471	3.399	0.835
July	151.1	54.98	19.96	187.1	174.5	3.501	3.428	0.833
August	161.8	59.97	19.63	188.1	175.1	3.512	3.438	0.831
September	149.6	67.90	22.11	157.6	146.6	2.916	2.853	0.823
October	148.1	72.18	21.20	143.2	133.2	2.669	2.610	0.829
November	129.8	81.00	21.02	120.0	111.1	2.265	2.216	0.840
December	145.4	84.82	21.51	130.9	121.3	2.463	2.410	0.837
Year	1844.3	833.94	21.08	1948.2	1813.0	36.368	35.594	0.830

Legends:

GlobHor

DiffHor

T Amb

GlobInc

Horizontal global irradiation

Horizontal diffuse irradiation

Ambient Temperature

Global incident in coll. plane

GlobEff

EArray

E\_Grid

PR

Effective Global, corr. for IAM and shadings

Effective energy at the output of the array

Energy injected into grid

Performance Ratio

## Grid-Connected System: Loss diagram

**Project :** ICC\_anfs2

**Simulation variant :** New simulation variant

### Main system parameters

PV Field Orientation

PV modules

PV Array

Inverter

User's needs

System type

**Grid-Connected**

tilt

23°

Model

CS6K - 275P

Nb. of modules

80

Model

Symo 20.0-3-M

Unlimited load (grid)

azimuth

0°

Pnom

275 Wp

Pnom total

**22.00 kWp**

Pnom

20.00 kW ac

### Loss diagram over the whole year

